

PIRJO KUULA-VÄISÄNEN
ANTTI NURMIKOLU

Kirjallisuusselvitys ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arvioinnista



Pirjo Kuula-Väisänen, Antti Nurmikolu

Kirjallisuusselvitys ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arvioinnista

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2012

Kannen kuva: Antti Nurmikolu

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-092-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Pirjo Kuula-Väisänen, Antti Nurmikolu: Kirjallisuusselvitys ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arvioinnista. Liikennevirasto, Väylänpito-osasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2012. 104 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-092-7.

Avainsanat: Ratarakenteet, elinkaariarviointi, elinkaaritaloudellisuus, elinkaaritehokkuus, elinkaarikustannukset, RAMS, kisko, ratapölkky, tukikerros, alusrakenne, pohjamaa

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli etsiä ensisijaisesti kansainvälisestä kirjallisuudesta tietoa ratarakenteiden elinkaarikustannuslaskentaan liittyvistä kunnan kehittymisen malleista, laskentamenetelyistä sekä ohjelmistoista. Lisäksi pyrittiin arvioimaan erilaisten mallien soveltuvuutta suomalaisiin ratarakenteisiin ja niiden kunnossapitoon. Oleellisena osana selvitystä oli myös radan eri rakenneosien kunnan kehittymiseen ja elinkaaren mallintamiseen vaikuttavien tekijöiden hahmottaminen. Työ on rajattu koskemaan ratarakenteen osia kiskosta alkaen aina pohjamaahan saakka. Ratojen taitorakenteita, kuten siltoja ei selvityksessä ole tarkasteltu. Selvityksen perusteella on myös tehty ehdotus jatkotutkimuksen tarpeista.

Ratarakenteiden ja koko rataympäristön elinkaaritaloudellisuustarkasteluista on tarjolla runsaasti kansainvälistä kirjallisuutta. Myös erilaisia malleja on kehitetty sekä yhteiseurooppalaisissa tutkimushankkeissa että muissa ulkomaisissa tutkimusohjelmissa. Myös kaupallisia, erilaisiin olosuhteisiin räätälöitävissä olevia ohjelmistoja on tarjolla useita. Ohjelmistot on usein rakennettu palvelemaan kunnossapitoa ja sen suunnittelua.

Kirjallisuudessa esitetyt elinkaarikustannus- ja kunnan kehittymisen mallit voidaan karkeasti jakaa mekanistisiin ja tilastollisiin/ekonomistisiin malleihin. Mekanistiset mallit ovat yleensä tarkempia kuin ekonomistiset, mutta vaativat enemmän yksityiskohtaisen tiedon keräämistä. Ekonomistisissa malleissa joudutaan tekemään hieman enemmän oletuksia ja näin ollen tulokset ovat joissain tapauksissa jopa liian yksinkertaistavia. Käytännössä optimaalinen elinkaarikustannuslaskenta ja kunnan kehittymisen mallintaminen on sekä mekanistisen että ekonomistisen mallinnuksen yhdistelmä. Kunnan kehittymisen mallintaminen ja elinkaarikustannuslaskenta vaatii lähtötiedoikseen järjestelmällisesti kerättyä kunto- ja kustannustietoa sekä rakenneosista että esimerkiksi kunnossapidosta. Myös erilaisia tilastomatemaattisia laskentamenetelyitä voidaan hyödyntää mallien kehittämisessä.

Jotta kunnan kehittymisen funktioita ja elinkaariarviointia voidaan kehittää, tarvitaan kustannustiedon lisäksi ratarakenteen kuntoa kuvaavien parametrien määrittämistä. Esimerkiksi raitteen geometrinen kunto, kaluston ja radan välistä vuorovaikutusta tai ratarakenteen jäykkyyttä kuvaavat parametrit ovat tärkeitä. Erityisen tärkeitä on, että tietoa voidaan kerätä tietopankkiin yhtenäisessä muodossa. Erilaiset rekisterit ovat tärkeässä roolissa, jotta malleja voidaan hyödyntää päätöksenteon tukena.

Jatkotutkimuksen lähtökohdaksi suositellaan Itävallassa, Ruotsissa ja Australiassa kehitettyjen mekanististen mallien soveltamista muutamassa pilot-kohteessa. Tämän rinnalla olisi hyödyllistä testata joitakin valmiita ohjelmistoja esimerkiksi kunnossapidon optimoinnin tarkoituksiin. Erittäin tärkeänä tekijänä elinkaariarvioinnin kehittämisessä on nykyisen rataverkolta mitatun tiedon nykyistä tehokkaampi hyödyntäminen. Tiedon avulla voidaan mahdollisesti kehittää parametreja kunnan kehittymisen funktioiden ja elinkaariarvioinnin lähtötiedoiksi. Valittujen pilot-kohteiden laskentatulosten perusteella on mahdollista myös ohjeistaa rataosittain päätöksenteon tueksi tehtäviä elinkaariselvityksiä. Jatkotutkimuksen tavoitteena on valittavien radan eri komponenttien kunnan kehittymisen ennakointiin perustuva mekanistinen malli, jonka avulla voidaan tehdä elinkaaritehokkaita kunnossapito- ja investointipäätöksiä.

Pirjo Kuula-Väisänen, Antti Nurmikolu: Litteraturstudie av analyser av bankonstruktioners livscykelekonomi. Trafikverket, Trafikledshållning. Helsingfors 2012 Trafikverkets undersökningar och utredningar 1/2012, 104 sidor och 1 bilaga ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-092-7.

Nyckelord: Bankonstruktioner, livscykel, livscykelanalys, livscykelekonomi, livscykeeffektivitet, livscykelkostnader, RAMS, räls, sliper, ballast, underbyggnad, undergrund

Sammanfattning

Syftet med undersökningen var i första hand att söka information i den internationella litteraturen om modeller, beräkningsmetoder och programvara som gäller kalkyleringen av livscykelkostnaderna för bankonstruktioner. Dessutom gjordes en bedömning av hur de olika modellerna kunde tillämpas på finska bankonstruktioner och på driften och underhållet av dem. En väsentlig del av utredningen går ut på att analysera vilka faktorer inverkar på utvecklingen av skicket hos de olika delarna av bankonstruktionen och på uppställandet av livscykelmodeller. Arbetet avgränsades till att gälla bankonstruktionens delar från rälsen till undergrunden. Särskilda konstruktioner, såsom broar, granskas inte. På basis av utredningen görs också ett förslag gällande fortsatta forskningsbehov.

Det finns gott om internationell litteratur om undersökning av livscykelekonomin för bankonstruktioner och hela banomgivningen. Olika modeller har utvecklats både inom allmän europeiska forskningsprojekt och inom andra utländska forskningsprogram. Det finns också ett stort utbud av kommersiell programvara som kan skräddarsys för olika förhållanden. Programvaran är ofta uppbyggd med tanke på att betjäna drift och underhåll och planeringen av underhållet.

De modeller för livscykelkostnadsutvecklingen och utvecklingen av skicket som förekommer i litteraturen kan grovt indelas i mekanistiska och statistiska/ekonomistiska modeller. De mekanistiska modellerna är i regel noggrannare än de ekonomistiska, men kräver mera insamling av detaljerad information. I de ekonomistiska modellerna måste något flere antaganden göras. Således har det i några fall lett till t.o.m. alltför förenklade resultat. En optimal beräkning av livscykelskostnaderna och uppställandet av modeller för utvecklingen av bankonstruktionernas skick är i praktiken en kombination av både mekanistisk och ekonomisk analys. Att ställa upp modeller för hur bankonstruktionens tillstånd utvecklas och att beräkna livscykelkostnader kräver som utgångspunkt systematisk insamling av data om konditionen och kostnaderna, liksom om konstruktionsdelarna och till exempel om underhållet. Även olika slag av matematisk/statistiska kalkyleringsmetoder kan utnyttjas för att ställa upp modeller.

Utvecklingen av funktioner för tillståndsutvecklingen och livscykelbedömningen kräver att parametrar definieras för beskrivningen av bankonstruktionens skick, utöver kostnadsdata. Viktiga parametrar är exempelvis sådana som beskriver spårets geometriska skick, interaktionen mellan vagnpark och bana och styvheten av bankonstruktionen. Det är särskilt viktigt att data kan samlas in i enhetlig form i en databank. För att modellerna ska kunna utnyttjas som stöd för beslutsfattandet är register av olika slag ytterst viktiga.

Som utgångspunkt för den fortsatta forskningen rekommenderas att mekanistiska modeller som utvecklats i Österrike, Sverige och Australien tillämpas på några pilotobjekt. Parallellt vore det till stor nytta att testa några färdiga programvaror med tanke exempelvis på optimeringen av driften och underhållet. En synnerligen viktig faktor vid utvecklingen av livscykelbedömningen är att data som mäts i det nuvarande bannätet utnyttjas effektivare. Det kunde vara möjligt att utgående från den informationen utveckla parametrar som utgångsdata för utvecklingen av funktioner för tillståndsutvecklingen och livscykelbedömningen. På basis av kalkylresultaten av de valda pilotobjekten är det även möjligt att ge anvisningar för livscykelutredningar av separata banavsnitt som görs till stöd för beslutsfattandet. Målet för den fortsatta forskningen är en mekanistisk modell som baseras på prognostiseringen av hur olika bankomponenters skick utvecklas. Med hjälp av modellen kunde livscykeleffektiva beslut fattas om drift, underhåll och investeringar.

Pirjo Kuula-Väisänen, Antti Nurmikolu: Literature review of life-cycle-economic evaluation of railway track structures. Finnish Transport Agency, Infrastructure Operations and Maintenance Department. Helsinki 2012. Research reports of the Finnish Transport Agency 1/2012. 104 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-092-7.

Keywords: track structure, life-cycle analysis, life-cycle economy, life-cycle efficiency, RAMS, rail, sleeper, ballast, substructure, subsoil

Summary

The aim of this review was to search primarily international literature for information about the degradation models, calculation methods, and software related to life-cycle costing of track structures. Another goal was to assess the applicability of different models to Finnish track structures and their maintenance. Outlining of the main factors affecting the modelling and degradation of different track components was also essential. The review was limited to track structure components from rails to subsoil. For example, bridges and other expert structures were excluded. Areas needing further research are also suggested.

A wide range of international literature on life-cycle economic evaluation of track structures and the entire railway environment exists. Various models have also been developed in pan-European and other international development projects. A variety of customisable commercial software also exists. Commercial modelling software are often intended to support maintenance and its planning.

The life-cycle and degradation models presented in literature can be divided roughly into mechanistic and statistical/econometric models. Mechanistic models are generally more accurate than statistical ones, but require collecting more detailed data. Statistical models require making more assumptions which can lead to simplified results. In practice, optimal life-cycle costing and modelling of degradation is a combination of mechanistic and statistical modelling. Modelling the degradation of track structures and life-cycle costing require systematic collection of track condition and cost data and maintenance information. Various mathematical-statistical calculation methods can also be utilised in the development of models.

To be able to develop the degradation functions and life-cycle analysis of track structures, the parameters describing degradation must also be developed. For example, the parameters describing rail geometry, train-track interaction, and stiffness of the track structure are important. It is highly significant that data are entered in the data bank in consistent form. Different registers play a major role in allowing use of life-cycle models in strategic decision making.

Testing of the degradation and modelling systems developed in Sweden, Austria and Australia in a few selected pilot projects is recommended as a starting point of further research. Along with that, it would be useful to test commercially available software in maintenance optimisation. A crucial factor in the development of life-cycle costing and analysis of Finnish railways is more efficient utilisation of current measured data along the rail network. They may allow developing parameters to serve as initial data for degradation functions and life-cycle analysis. Based on the calculation results from selected pilot projects it is also possible to produce instructions for life-cycle assessments by rail sections. The main purpose of the further research should be to develop a mechanistic degradation model for various selected track components that allows making life-cycle economic maintenance and investment decisions.

Esipuhe

Tämä ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arviointia käsittelevä kirjallisuustutkimus tehtiin Liikenneviraston toimeksiannosta Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä osana Elinkaaritehokas rata - tutkimusohjelmaa.

Raportin laati dipl.ins. Pirjo Kuula-Väisänen ja työtä ohjasi tekn. tri Antti Nurmikolu Tampereen teknillisestä yliopistosta. Työn ohjaajana tilaajan puolelta toimi projektipäällikkö Marko Tuominen.

Helsingissä helmikuussa 2012

Liikennevirasto

Väylänpito-osasto/väylänpidon suunnitteluyksikkö

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	ELINKAARITALOUEDELLISUUTEEN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ.....	10
2.1	Elinkaarisystematiikka ja -kustannuslaskenta.....	10
2.2	RAMS	14
2.3	Elinkaarilaskennassa hyödynnettävät laskenta- ja analyysitekniikat	15
2.3.1	Järjestelmän tai toiminnan määrittelyyn käytettävät menetelmät.....	16
2.3.2	Matemaattiset menetelmät ja jakautumafunktiot	20
2.3.3	Epävarmuuden ja riskien arviointi Monte Carlo simuloinnilla.....	21
3	KUSTANNUSTEN JAOTTELU JA RAJAKUSTANNUKSET	25
3.1	Kustannusten jaottelu Suomessa.....	26
3.2	Ratamaksut ja rajakustannukset	28
3.2.1	Rajakustannukset Suomessa	29
3.2.2	Rajakustannukset ja kustannusfunktiot muualla Euroopassa.....	32
3.3	Kunnossapitokustannukset	34
3.4	Investointikustannukset.....	39
3.5	Viivytyksistä ja suorituskyvystä aiheutuvat kustannukset	41
4	ELINKAARIKUSTANNUSTEN JA KUNNON KEHITTÄMISEN ARVIOINNISSA KÄYTETTYJÄ MENETELMIÄ	43
4.1	Yleistä	43
4.2	Eurooppalaiset yhteisprojektit.....	44
4.3	Mekanistiset mallit.....	46
4.3.1	USA	47
4.3.2	Australia.....	48
4.3.3	Ruotsi	51
4.3.4	Itävalta	56
4.3.5	Iso-Britannia	58
4.4	Tilastolliset ja ekonomistiset mallit.....	59
4.5	Herkkyys- ja epävarmuustarkastelut	62
4.6	RAMS ja elinkaarilaskenta	63
5	SUOMEN RATARAKENTEISTA SAATAVILLA OLEVA TIETO	65
5.1	Elinkaariselvitykset.....	65
5.2	Ratapurkki ja muut tietovarastot.....	66
6	KUNNON KEHITTÄMINEN RAKENNEOSITTAIN.....	69
6.1	Radan alus- ja pohjarakenteet	69
6.1.1	Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit.....	69
6.1.2	Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista	73
6.2	Tukikerros	75
6.2.1	Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit.....	75
6.2.2	Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista	76
6.3	Ratapölkkyt.....	79
6.3.1	Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit.....	79
6.3.2	Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista	80
6.4	Kiskot.....	82
6.4.1	Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit.....	82
6.4.2	Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista	84

6.5	Rakenneosiin ja kalustoon liittyvät vuorovaikutussuhteet	87
6.5.1	Vuorovaikutus- ja vaurioitumismekanismit	87
6.5.2	Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista	89
7	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	91
7.1	Yhteenveto	91
7.2	Kirjallisuudesta havaittuja soveltamismahdollisuuksia	94
7.3	Jatkotutkimussuositukset	95
	KIRJALLISUUS.....	97

LIITTEET

Liite 1.	Elinkaarikustannuslaskennassa ja kunnon kehittymisen arvioinnissa käytettyjä ohjelmistoja
----------	--

1 Johdanto

Rataympäristön elinkaaritehokkuus koostuu useista niin ratarakenteiden teknisiin elementteihin kuin liikennöinnin turvallisuuteen ja käytettävyyteen liittyvistä komponenteista. Elinkaaritehokas rataympäristö tuottaa käyttäjilleen turvallisia junamatkoja mahdollisimman edullisesti ja ekotehokkaasti. Rataympäristön monimuotoisuuden vuoksi koko elinkaaritehokkuuden ratkaiseminen yhdellä kertaa on mahdotonta, mutta erityisesti ratarakenteisiin liittyvän teknillisen tiedon lisäämisellä esimerkiksi komponenttien kunnon kehittymismallien myötä on mahdollista ottaa merkittäviä askelia tehokkuuden parantamiseksi.

Ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden selvittäminen ja parantaminen on eräs Liikenneviraston rahoittaman Ratarakenteita koskevan tutkimusohjelman tavoitteista. Elinkaaritutkimukset on aloitettu Kolarin seudun kaivoshankkeiden kuljetustarpeisiin sovelletulla tarkastelulla (Nurmikolu et al. 2009) ja jatkettu Oona-Lina Koskelan diplomityöllä, jossa selvitettiin elinkaarikustannuslaskennan perusteita ja soveltamista ratarakenteisiin (Koskela 2009). Työn jatkotutkimussuosituksen perusteella aloitettiin tässä raportoitava elinkaarikustannuslaskentaan ja rakenteiden kunnon kehittymisen malleihin liittyvä kirjallisuusselvitys, jonka tarkoituksena on perehtyä syvällisemmin kansainväliseen tutkimukseen ja muualla, erityisesti muissa Euroopan maissa, käytössä oleviin elinkaarikustannuslaskentamalleihin ja -järjestelmiin sekä ratarakenteiden kunnon kehittymisen malleihin.

Kirjallisuusselvityksen perusteella on myös tarkoitus arvioida erilaisten mallien soveltuvuutta suomalaiseen toimintaympäristöön. Lopputuloksena on tarkoitus tehdä ehdotus elinkaarikustannuslaskennan kehittämisen edellytyksistä suomalaisessa rataympäristössä ja tarvittavasta jatkotutkimuksesta. Työ liittyy kiinteästi muihin TTY:ssä käynnissä oleviin ratatutkimushankkeisiin, koska niissä kehitettävät rakenteosien kunnon kehittymismallit tulevat olemaan eräs elinkaarikustannuslaskennan peruslähtökohdista.

Työ on rajattu ratarakenteisiin siten, että kiskon ja liikkuvan kaluston vuorovaikutuksesta edetään alaspäin pohjamaahan saakka. Selvityksessä viitataan myös muuhun rataympäristöön, kunnossapidon optimointiin ja rakenteen kunnon mittaamiseen liittyviin elinkaarimalleihin ja -selvityksiin, koska ne ovat tärkeitä elementtejä kokonaisuuden kannalta. Työn sisällön jaottelu on tehty Elinkaaritehokas rata (TERA) hankkeen rakennetta mukaillen, kuitenkin siten, että sillat on rajattu selvityksestä pois.

2 Elinkaaritaloudellisuuteen liittyviä käsitteitä

2.1 Elinkaarisystematiikka ja -kustannuslaskenta

Elinkaarisystematiikkaa on kuvattu kirjallisuudessa useissa eri lähteissä. Eräs systematiikan kuvauksista löytyy IEC-standardisarjasta 60300, jossa on kuvattu yksityiskohtaisesti elinkaarilaskennan soveltamista erilaisiin prosesseihin, kuten esimerkiksi rautatievaunun valintaan. Sinänsä elinkaarikustannuslaskenta on melko yksinkertaista matematiikkaa, mutta koska kysymyksessä on myös tulevaisuuden ennustaminen, on erilaisten kunnan kehittymismallien tunteminen erittäin kriittistä saatavien tulosten kannalta. Useinkaan tuotteiden tai rakenteiden kunnan kehittymisestä ei välttämättä ole yksityiskohtaista tietoa ja näin ollen joudutaan mallintamaan käyttäytymistä erilaisten tilastollisten menetelmien avulla. (IEC 60300-3-3 2004)

Elinkaarikustannuslaskenta (LCC) on taloudellisen analytiikan prosessi, jonka avulla voidaan arvioida hankinnan, omistamisen, käytön ja tuotteen hävittämisen kokonaiskustannuksia. Elinkaarikustannuslaskenta on siis taloudellista arviointia, joka kattaa kaikki taloudellisen käyttöiän aikana syntyvät kustannukset ilmaistuna jossakin rahayksikössä (Esveld 2001). Elinkaarilaskennan avulla tuotetaan tietoa päätöksenteon tueksi tuotteen suunnittelu, kehittämis-, käyttö- ja käytöstä poistovaiheisiin. Elinkaarilaskennan avulla voidaan myös arvioida erilaisten kunnossapitotoimenpiteiden tehokkuutta tuotteen elinkaaren eri vaiheissa. Standardin mukaan elinkaarikustannuslaskenta on tehokkaimmillaan silloin, kun tuotetta voidaan optimoida kustannusten perusteella jo suunnitteluvaiheessa. (IEC 60300-3-3 2004)

Käyttöikä on aika, jolloin tuote täyttää sille asetetut tekniset vaatimukset. Käyttöiän aikana tuotetta voidaan käyttää ja sitä on taloudellisesti mielekästä kunnossapitää. Tämä ajanjakso valitaan yleensä elinkaaritaloudellisuuden tarkastelujaksoksi. Vastaavasti *kestoi* termi sisältää tuotteen vaiheet valmistumisen ja turmeltumisen välissä, jolloin tuote on käytettävissä kunnossa. Kestoiän päättyessä tuotetta ei voida enää käyttää. (Koskela 2009)

Elinkaarikustannuslaskennan tavoitteena tulee olla myös eritasoisten kustannusten tunnistaminen. Kustannusanalyysin avulla tunnistetaan ne kustannukset, joilla on eniten vaikutusta ja ne kustannukset, joilla ei ole käytännössä juurikaan merkitystä. Ratkaisevin tekijä elinkaarilaskennan kannalta on tuotteen elinkaaren ymmärtäminen ja ne toimenpiteet, joita elinkaaren aikana tehdään. Ratkaisevaa on myös tuotteen toiminnan turvallisuuden, kunnossapidettävyyden ja muiden ominaisuuksien riippuvuussuhteiden ymmärtäminen.

Elinkaarianalyysi (LCA) kutsutaan menettelyä, jossa huomioidaan myös tuotteen tai rakenteen elinkaaren aikana syntyneet ympäristövaikutukset. Elinkaarianalyysijä voidaan tehdä myös taloudellisesta ja sosiaalisesta näkökulmasta.

Elinkaaritehokkuus koostuu käyttöiän aikaisesta kustannustehokkuudesta ja teknisestä tehokkuudesta. Elinkaaritehokkaassa ratarakenteessa uuden tai parannettavan ra-

dan rakenneosien ja niiden muodostaman kokonaisuuden laatutaso (muun muassa materiaalivalinnat ja mitoitus) samoin kuin rakenteen käyttöikä ja sen aikaisen kunnossapidon taso ovat rakenteen vaurioitumismekanismit huomioiden kustannusoptimoitu vastaamaan liikenteellistä tarvetta.

Elinkaaren kuusi vaihetta ovat: konsepti ja määrittely, suunnittelu ja kehittäminen, tuotanto, asennus, käyttö ja kunnossapito sekä tuotteen poistaminen käytöstä (kuva 1). Kustannukset voidaan jakaa hankintakustannuksiin, omistamiskustannuksiin ja hävittämiskustannuksiin. Näistä omistamiskustannukset ovat vaikeimmin määritettävissä oleva osa, eikä niitä välttämättä kaikilta osin voida edes selvittää. Tuotteen elinkaaren alkuvaiheessa tehdyillä päätöksillä on useimmiten suurempi vaikutus kokonaiskustannuksiin kuin elinkaaren loppupäässä tehdyillä ratkaisuilla. Käyttövarmuuteen liittyvät tekijät tulee sisällyttää elinkaarilaskentaan ja niitä olisi syytä tarkastella jo tuotteen määrittelyvaiheessa. (IEC 60300-3-3 2004)

Elinkaaren vaiheet

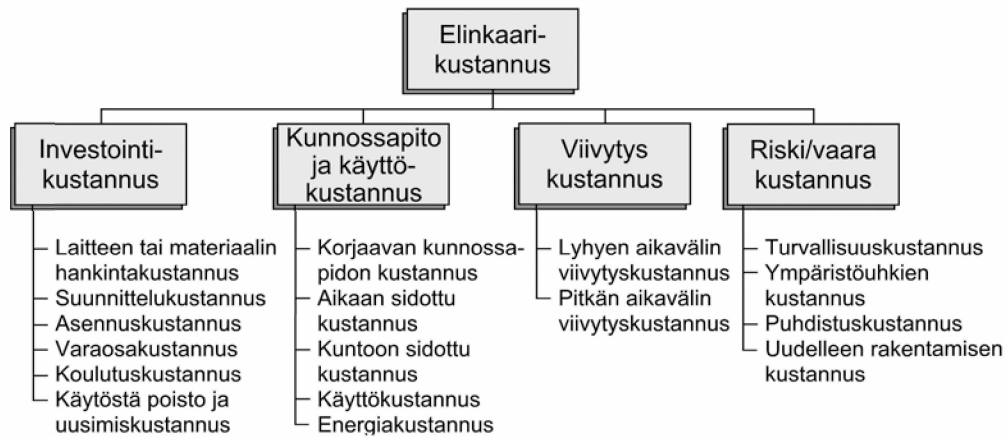


Kuva 1. Standardin IEC 60300-3-3 mukaiset tuotteen elinkaaren yleiset vaiheet. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (IEC 60300-3-3 2004).

Välillisiä kustannuksia syntyy, kun tuote tai palvelu ei ole saatavissa. Välillisiä kustannuksia voivat olla takuukustannus, luotettavuuskustannus, liikevaihdon pienentyminen ja korvaavan vaihtoehdon aiheuttama kustannus. Lisäksi välillisiin kustannuksiin voidaan laskea imagon, arvovallan ja maineen menetys, jotka johtavat asiakkaan menettämiseen. Myös näistä menetyksistä johtuvan huonon maineen lieventämisestä johtuvat kustannukset pitää laskea mukaan. Välillisiä kustannuksia on usein vaikea arvioida. Myös palvelun tai tuotteen saatavuus on usein merkittävä tekijä elinkaarikustannuslaskennassa. Jos palvelua tai tuotetta ei ole saatavilla, se voi aiheuttaa lisäkustannuksia esimerkiksi korvaavan kuljetuksen järjestämisenä. Laskennalliset elinkaarikustannukset eivät aina vastaa todellisia elinkaaren aikana syntyviä kustannuksia, koska monet esimerkiksi ympäristöstä johtuvat tekijät saattavat satunnaisesti vaikuttaa kustannuksiin. (IEC 60300-3-3 2004)

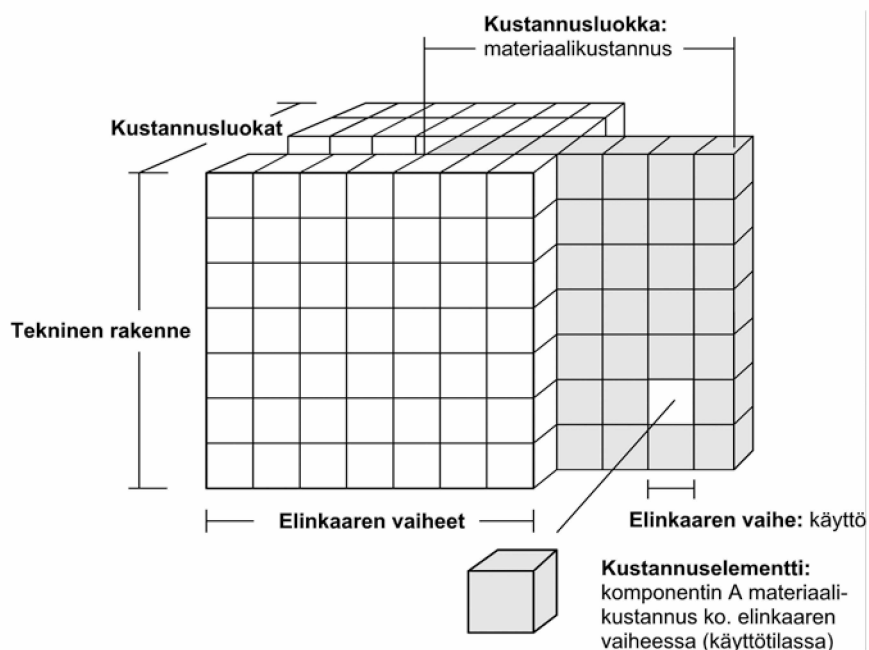
Elinkaarikustannusmalli on aina yksinkertaistettu esitys todellisesta maailmasta. Tuotteet, joilla on pitkä elinkaari, voivat käytön aikana muuttua tai niiden toiminnassa voi tapahtua muutoksia tai parannuksia. Nämä tekijät olisi otettava mukaan malliin. Mallin rakentamiseksi kustannukset on jaettava rakenteellisiksi kustannuselementeiksi. Kustannuselementtien pitää olla tarkasti määriteltävissä ja arvioitavissa. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki elinkaarikustannusten luokittelusta.

Elinkaarikustannusten luokat



Kuva 2. Elinkaarikustannuslaskennan kustannusluokat. Kaavio on käännetty suomeksi julkaisusta (Hokstad 1998).

Kuvassa 3 esitetty elinkaarisystematiikan malli perustuu siihen, että tarkasteltava rakenneosa jaetaan ensin pienempiin elementteihin, joille voidaan määritellä esimerkiksi materiaali-, työ- ja laitekustannukset. Vaaka-akselilla on aika tai elinkaaren vaihe, jossa esimerkiksi työkustannukset jaetaan eri kustannuselementteihin. Innotrack-projektissa luotu kustannusmatriisi on elinkaarikustannuslaskennan peruslähtökohta ja sisältää kaikki syntyvät suorat kustannukset. Innotrack-projektissa ei otettu huomioon välillisiä kustannuksia, kuten arvon vähentymistä, koska jo kuvan kaltaisen kustannusmatriisin aikaansaaminen usean eri Euroopan maan kustannusluokittelun perusteella oli mittava tehtävä. (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)



Kuva 3. Innotrack-projektissa laadittu kolmiulotteinen elinkaarisystematiikan malli. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack Guideline D6.5.4 2006).

Koska rautatieinfrastruktuurilla ja erityisesti ratarakenteella on pitkä *elinkaari* ja investoinnit ovat kalliita, on päätöksentekijöiden otettava huomioon niin rakentamisen, kunnossapidon kuin liikenteenkin prosessit ja pitkän aikavälin kustannukset. (Esveld 2001)

Radan elinkaarikustannukset voidaan määritellä Esveldin (2001) mukaan kahdella tavalla: *Aineellisia kustannuksia* ovat todelliset kustannukset, kuten työkustannukset, materiaalit ja laitteet. *Aineettomia kustannuksia* ovat muun muassa rakenneosan kunnan heikkeneminen, viivytykset, turvallisuuden tai matkustusmukavuuden heikkene-
misen sekä melun aiheuttamat kustannukset. Kustannukset diskontataan nykyarvoon tapauskohtaisesti valitulla korolla.

Esveldin mukaan investointi- ja kunnossapitokustannuksien arvioinnissa voidaan käyttää kolmea erilaista tapaa:

1. *Nettonykyarvo* (NPV) on kaikkien diskontattujen kustannusten summa. Mitä suurempi kokonaisnykyarvo on, sitä epäedullisempi investointi tai toimenpide on vertailuvaihtoehtoon verrattaessa.
2. *Sisäisen korkokannan* (internal rate of return) avulla voidaan vertailla erilaisten investointien keskinäisen kannattavuuden eroja. Laskentamenetelmällä etsitään sisäistä korkokantaa eli korkokantaa, jolla investoinnin ja säästöjen nettonykyarvo on nolla. Investoinnin edullisuus riippuu siitä, onko sisäinen korkokanta vähintään yhtä suuri kuin tavoitteeksi asetettu pääoman tuotto. Mitä suurempi sisäinen korkokanta on, sitä parempi investointi on.
3. *Annuiteetti* on korkojen ja lyhennysten summa, joka on maksettava joka vuosi investoinnin tai kunnossapidon rahoittamiseksi. Annuiteetti on kriteereistä merkityksekkäin, koska sen avulla voidaan vertailla elinkaareltaan erimittaisia projekteja. (Esveld 2001)

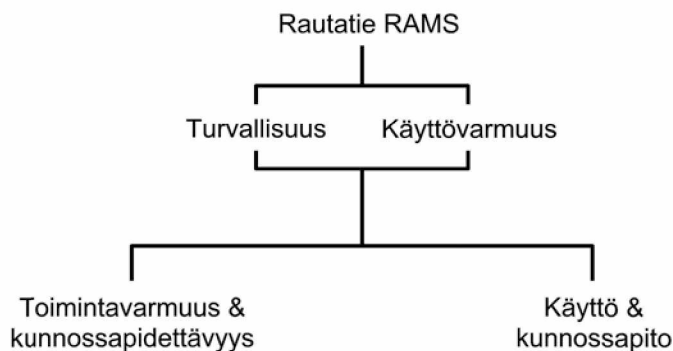
Nettonykyarvomenetelmä on Innotrack-tutkimusprojektin mukaan paras ratainfrastruktuuriin liittyvää budjetointia ja strategista päätöksentekoa palveleva laskentamenettely. Toki muillakin elinkaarilaskennan menetelmillä saadaan arvokasta lisätietoa kustannusvaikutuksista. (Innotrack Guideline D6.5.4 2006) Elinkaarikustannuslaskennan suurimmat epävarmuudet liittyvät radan kunnan kehittymisen ennustamiseen. Koska useinkaan ei ole saatavissa riittävästi tietoa esimerkiksi radan kunnossapitohistoriasta, näin ollen epävarmuuden käsittelyyn on kiinnitettävä erityinen huomio. Epävarmuustarkastelut voidaan Esveldin (2001) mukaan karkeasti jakaa kahteen erilaiseen menettelytapaan herkkyyssanalyysiin ja simulointiin.

Herkkyyssanalyysissä lähtötietojen arvoja muutetaan tietyllä prosenttimäärällä ja näin voidaan arvioida tulosten ”kestävyyttä”. Herkkyyssanalyysin avulla voidaan löytää tuloksiin herkimmin vaikuttavat lähtötiedot. Koska herkkyyssanalyysissä voidaan vertailla yleensä vain yhtä parametria kerrallaan, on monimutkaisen järjestelmän epävarmuustarkastelussa usein kannattavampaa käyttää *simulointia*. Esimerkiksi Monte Carlo -simulaatio on kehittyneempi menetelmä, jossa voidaan muuttaa kaikkia tekijöitä yhtä aikaa. Usean muuttujan merkityksen simulointi on kuitenkin huomattavasti vaativampi tehtävä kuin yksittäisten lähtötietojen herkkyyssanalyysi. Simulointi on kannattavaa esimerkiksi suurissa investoinneissa, mutta yksinkertaisessa LCC-analyysissä herkkyyssanalyysi yleensä riittää. (Esveld 2001)

2.2 RAMS

RAMS on lyhenne englanninkielisistä sanoista Reliability, Availability, Maintainability ja Safety, jotka voidaan kääntää suomeksi termeillä *toimintavarmuus, käyttövarmuus, kunnossapidettävyyden ja turvallisuus*. *RAMS*-elementtien keskinäiset suhteet on esitetty kuvassa 4. *RAMS*-menettelyn avulla voidaan varmistaa, että järjestelmä täyttää edellä mainituille ominaisuuksille asetetut vaatimukset ja sen avulla voidaan myös ennakoida käyttö- ja kunnossapitokustannuksia. (Kivipuro, Reunanen & Valkokari 2008).

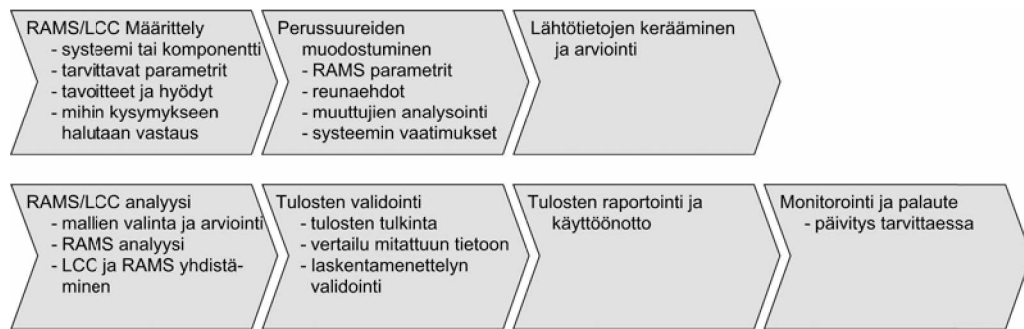
RAMS-menettely on määritelty standardissa EN 50126-1. Standardi on laadittu nimenomaan rautatiesovelluksia varten. (EN 50126-1 1999) Rautatiemaailmassa *RAMS*:n avulla määritellään luotettavuutta, jolla voidaan taata tavoitteen mukaisuus eli tietyn tasoinen rautatieliikenne. *RAMS* vaikuttaa suoraan siihen palvelutasoon, jolla tuote toimitetaan asiakkaalle eli matkustajalle tai tavarankuljettajalle.



Kuva 4. *RAMS*:n elementtien keskinäiset suhteet. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (EN 50126-1 1999)

RAMS:n vaatimusten täyttäminen tarkoittaa kaikkien eri osa-alueiden elementtien ja tekijöiden kontrollointia koko elinkaaren aikana. Monimuotoisessa rautatieympäristössä tämä tarkoittaa useiden eri järjestelmien yhtäaikaista kontrollointia ja tarvittavaa säätöä. *RAMS* on erittäin yksityiskohtainen ja monipuolinen järjestelmä ja vaatii useiden erilaisten parametrien määrittämisen. *RAMS*:n soveltamista käsitellään esimerkkien avulla luvussa 4. *RAMS*:n soveltaminen suomalaiseen rautatieympäristöön kokonaisuudessaan on vielä tulevaisuuden haaste, mutta joillakin osa-alueilla sitä on jo sovellettu ja voidaan jatkossa mahdollisesti soveltaa myös radan rakenteiden elinkaarikustannuslaskennan lisänä. Muun muassa Härkönen (2008) on tutkimuksessaan soveltanut *RAMS*-periaatteita turvalaitteiden elinkaaren hallintaan. *RAMS* määrittelyn avulla voidaan hahmottaa kaikki ne kustannukset, jotka syntyvät elinkaaren aikana esimerkiksi turvallisuuden tai käyttövarmuuden perusteella. *RAMS* sisältää kuitenkin paljon myös sellaisia elementtejä, joiden kustannuksia on vaikeata tai mahdotonta arvioida. (EN 50126-1 1999)

Käytännössä *RAMS* ja elinkaarikustannuslaskenta voidaan yhdistää samaan prosessiin (kuva 5). Ratarakenteiden elinkaarikustannustarkasteluissa *RAMS*-elementeistä voidaan ottaa huomioon toimintavarmuus ja kunnossapidettävyyden, käyttövarmuus ja turvallisuus ovat enemmän koko rautatiejärjestelmän tasolle kuuluvia elementtejä.



Kuva 5. RAMSin liittyminen elinkaaren eri vaiheisiin. Kuva on muokattu ja käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)

2.3 Elinkaarilaskennassa hyödynnettävät laskenta- ja analyysitekniikat

Elinkaarikustannuslaskennan lähtökohta on kerätyn kustannus- ja muun tarvittavan tiedon järjestäminen laskentaa tukevaan järjestelmään. Tiedon järjestämiseen ja kokonaiskuvan hahmottamiseen voidaan käyttää erilaisia standardoituja tekniikoita. Elinkaarisystematiikka edellyttää myös erilaisten syy-seuraussuhteiden hahmottamista. Myös varsinaisen analyysin tekemiseen on käytettävissä erilaisia matemaattisia ja tilastotieteellisiä menetelmiä, joiden soveltamiseen on käytettävissä erilaisia kaupallisia ohjelmistoja.

Rataympäristö on syy-seuraussuhteineen monimutkainen ympäristö. Erilaisten tekniikoiden avulla voidaan kuitenkin kehittää pelkistettyjä malleja, joiden luomisessa on jätettävä joitakin pienemmän merkityksen omaavia asioita tarkastelun ulkopuolelle. Lisäksi yleensä on tehtävä joitakin oletuksia niiden parametrien osalta, joille ei voida yksiselitteisesti antaa mitään arvoa tai funktiota.

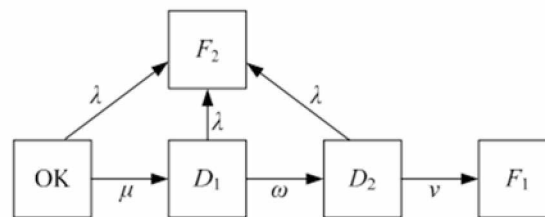
Tässä luvussa kuvataan lyhyesti muutamia yleisimmin elinkaarikustannuslaskentaa käsittelevässä kirjallisuudessa esiintyviä analyysi- ja laskentatekniikoita, joita voidaan soveltaa joko elinkaarilaskennan tilastollisiin tarkasteluihin, RAMS-analyysiin, järjestelmien toimintavarmuuden tai luotettavuuden laskentaan tai erilaisten mekaanisten kunnonkehittymismallien kehittämiseen ja analysointiin. Perusperiaatteena erilaisten mallien rakentamisessa on mallin kuvaaminen graafisesti ja erilaisten matemaattisten laskentamallien käyttö kunnon kehittymisen tai komponentin vikaantumisen todennäköisyyden arvioinnissa. Monimutkaisten järjestelmien kuvaamiseen liittyy kiinteästi myös käytettyjen parametrien ja funktioiden epävarmuuden ja riskien arviointi. Laskennan toteuttamiseen tarvitaan laskentatekniikan lisäksi myös rataympäristön eri prosessien ymmärtämistä, kunnon kehittymisen funktioita ja luotettavia lähtötietoja. Perusperiaatteena on kuitenkin se, että aineistoista löydetään kaikkein todennäköisimmät skenaariot, jonka jälkeen voidaan tehdä tilastollinen arvio tulosten luotettavuudesta.

2.3.1 Järjestelmän tai toiminnan määrittelyyn käytettävät menetelmät

Markovin tekniikka

Markovin tekniikalla kuvataan systeemin muutosta tilasta toiseen ajan suhteen diagrammin avulla standardin IEC 61165 mukaisesti. Markovin tekniikalla kuvataan usein systeemejä, joiden vaurioituminen muodostuu useasta eri tekijästä tai joiden kunnossapito on monimutkaista. (IEC 61165 2006)

Markovin tekniikan avulla voidaan mallintaa ja analysoida määriteltyä systeemiä ja arvioida sen toimintavarmuutta, käyttövarmuutta, kunnossapidettävyyttä ja turvallisuutta. Tekniikan avulla luodaan muutosta kuvaavien kertoimien tai todennäköisyysfunktioiden avulla diagrammeja eri elementtien muuttumisen kuvaamiseksi sekä lasketaan koko systeemin toimintaa kuvaavia parametreja. Jokaiselle elementille on käytännössä olemassa vai kaksi tilaa eli elementti toimii tai ei toimi sille määritellyssä tehtävässä (kuva 6). Vaikka yksittäisellä elementillä on vain kaksi tilaa, voi koko systeemillä olla useita eri tiloja eri elementtien toiminnan tilan kombinaatioiden mukaisesti. Markovin tekniikka sopii erityisesti sellaisille systeemeille, joiden kunnossapitostrategiat ovat monimutkaisia johtuen esimerkiksi kunnossapidon priorisoinnin tai resurssien kohdentamisen vaikeuksista. Yksi tekniikan soveltamisen haasteista on sellaisen systeemin luominen, joka vastaa käytännön toimintaa. Rataympäristön monimuotoisuuden vuoksi on aina tehtävä joitakin yksinkertaistuksia. (IEC 61165 2006)



Kuva 6. Yleinen Markovin vauriomalli. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

Kuvassa 6 esitetyt symbolit F_1 ja F_2 kuvaavat vaurioituneita tiloja. F_1 on esimerkiksi kiskon kulumisesta johtuva ajan ja kuormituksen funktiona etenevä vaurio ja F_2 on äkillinen esimerkiksi suuresta ylikuormituksesta johtuva äkillinen vaurio, kuten kiskon katkeaminen. Systeemin tila muuttuu OK tilasta ajan funktiona lievään vaurioituneeseen tilaan D_1 ja edelleen tiloihin D_2 ja F_1 . Kreikkalaisilla kirjaimilla kuvataan erilaisia vaurioitumisnopeuksia. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

Markovin tekniikan standardin IEC 61165 mukaiseen käyttöön liittyy kuitenkin muutamia rajoituksia ja oletuksia. Markovin tekniikan yhtenä perusoletuksena on, että vaurioitumisnopeudet λ , μ , ω ja ν ovat vakioita ja ajasta riippumattomia. Toisin sanoen elementtien kunnan kehittyminen tapahtuu koko ajan vakionopeudella, mikä ei todellisuudessa pidä paikkaansa vaan kunnan kehittymisen nopeus voi olla erilainen elinkaaren eri vaiheissa. Toinen menetelmän rajoituksista liittyy siihen, että matemaattisia ratkaisuja käytettäessä systeemin tuleva käyttäytyminen riippuu ainoastaan systeemin nykytilasta eli annetuista lähtötiedoista. Tällöin sitä, miten systeemi on muuttunut ennen nykytilaa, ei oteta huomioon. (IEC 61165 2006)

Markovin tekniikan soveltamisen lähtökohtana on systeemin analysointi ja sen jälkeen tapahtuva systeemin määrittely ja rajoitusten asettaminen. Systeemin analyysi toteutetaan asettamalla koko analyysille tietty selkeä tavoite, esimerkiksi jonkun radan rakenneosan kestoajan ja siihen vaikuttavien tekijöiden analysointi. Analyysissä ja määrittelyissä etsitään systeemin ja elementtien tärkeimmät mallinnettavat ominaisuudet. Myös erilaisten lähtöoletusten ja vaurioitumis- tai parantumisenopeuksien epävarmuutta on pohdittava jo alkuvaiheessa. Kaikkein kriittisin Markovin tekniikan soveltamisen kohta on muutosdiagrammin laadinta. Laaditun diagrammin analyysi tehdään tunnetuilla matemaattisilla menetelmillä, joita voivat olla esimerkiksi matriisilaskennan sovellutukset. (IEC 61165 2006)

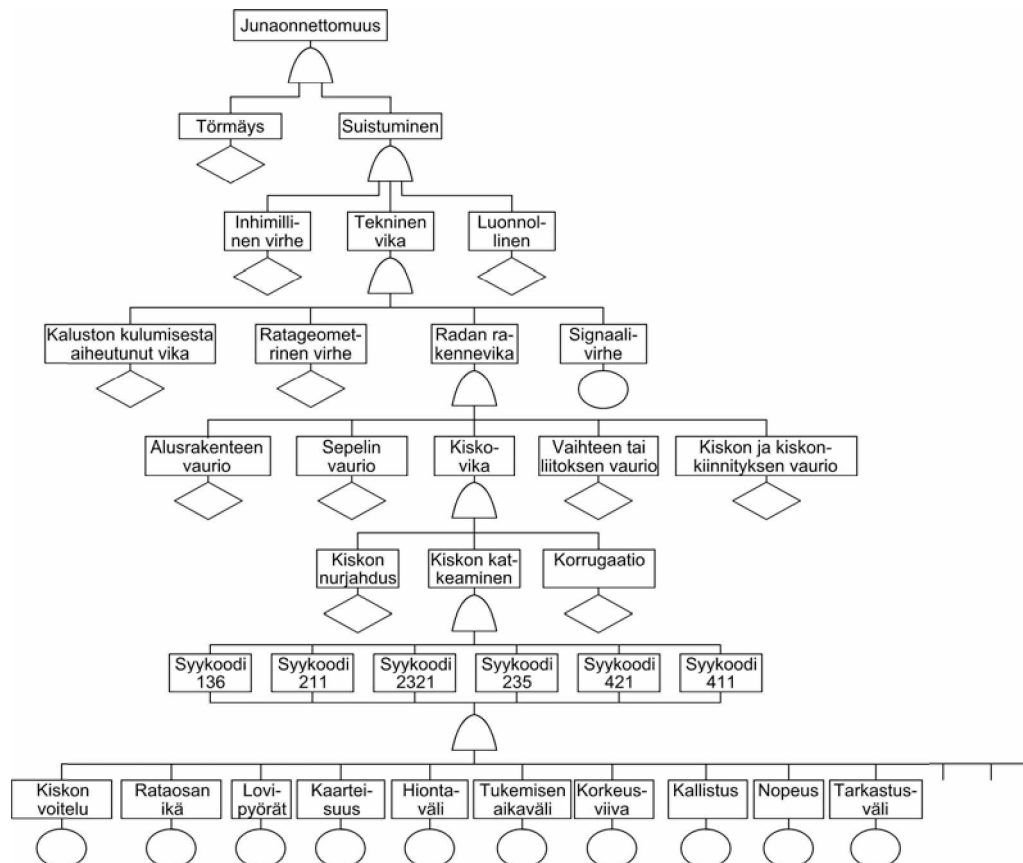
Kun Markovin tekniikalla on luotu jollekin rakenneosalle kuvan 6 mukainen malli ja vaurioitumisnopeudet tunnetaan, voidaan esimerkiksi melko monimutkaisen matriisi- ja todennäköisyyslaskennan avulla ratkaista kiskojen tarkastukselle optimitaajuus. Lopullisen laskennan lähtötiedoiksi tarvitaan historiatietoja tarkastuksista, vaurioista ja arvio esimerkiksi vaurioiden havaitsemisen todennäköisyydestä. Markovin tekniikan avulla voidaan arvioida muun muassa turvallisuuden kannalta kriittisin vaurioitumisnopeus, keskimääräinen aika, jolla saavutetaan turvallisuuden kannalta vaarallisin vaurio, keskimääräinen aika, jolla kuntotaso pysyy samana tai muuttuu seuraavalle tasolle tai todennäköisyys, jolla tietty elementti pysyy toimintakunnossa tietyn ajan. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

Vikapuuanalyysi

Vikapuuanalyysi eli Fault Tree Analysis (FTA) on hieman Markovin tekniikkaa vastaava kuvaus- ja analyysimenettely, jolla arvioidaan vaurioiden tapahtumisen todennäköisyyttä tietyllä ajan hetkellä käyttäen Boolean logiikkaa. Vikapuuanalyysillä ei aina pystytä kuvaamaan ajan ja elementtien tilan välisiä riippuvuussuhteita. Vikapuuanalyysi on myös standardoitu menetelmä ja sen perusteet on esitetty standardissa IEC 61025. Vikapuu on graafinen kuvaus olosuhteiden tai eri tekijöiden tai niiden yhdistelmien vaikutuksesta systeemin vikaantumiseen tai sellaiseen tilanteeseen, jossa systeemi ei enää toimi halutulla tavalla. Vikapuuanalyysiä on käytetty muun muassa liikennejärjestelmien, rautatiejärjestelmien ja tietokonejärjestelmien suunnittelussa. (IEC 61025 2006)

Vikapuuanalyysi voidaan tehdä kvalitatiivisesti tai kvantitatiivisesti. Kvalitatiivinen analyysi soveltuu tapauksiin, joissa lopputulokseen vaikuttavien yksittäisten tapausten todennäköisyyttä ei pystytä arvioimaan. Kvantitatiivisessa analyysissä todennäköisyydet tunnetaan. (IEC 61025 2006) Vikapuuanalyysin toteuttamiseen on tarjolla useita kaupallisia ohjelmistoja.

Vikapuuanalyysiä on käytetty esimerkiksi junaonnettomuuksien ja niihin liittyvien tekijöiden kuvaamisessa (kuva 7). Vikapuun päätapahtumana on tällöin onnettomuus, joka voi aiheutua joko törmäyksen tai kiskoilta suistumisen vuoksi. Kiskoilta suistumiseen johtavina osatekijöinä kuvataan muun muassa radan eri komponenttien kunnon heikkenemistä ja vaurioitumista. (Kumar 2008)



Kuva 7. Junaonnettomuuden vikapuu. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Kumar 2008).

Petri Net menetelmä

Myös Petri Net -menetelmä on graafinen menetelmä, jolla esitetään ja analysoidaan kompleksisia loogisia vuorovaikutussuhteita systeemin eri komponenttien välillä. Petri Net -standardi IEC 62551 on vielä tekeillä, mutta aiheesta on julkaistu korkean tason Petri Net -menettelyjä käsittelevä standardi (ISO/IEC 15909-1 2004). Petri Net -kaaviosta voidaan luoda suoraan myös Markovin ketju. Menetelmällä kuvataan systeemin rakenne ja toiminta lähtien liikkeelle yksinkertaisista elementeistä, joita tarvitaan usein vähemmän kuin Markovin ketjuissa.

Petri Net -menetelmää on käytetty rataympäristössä muun muassa raidevirtapiirin käyttövarmuuden ja kunnossapidon optimoinnissa (kuva 8). Kunnan kehittymistä on kuvattu Weibull-todennäköisyysjakautuman avulla. (Patra, Dersin & Kumar 2010, Patra, Kumar 2010) Petri Net -menetelmää on käytetty myös liikenteen toimintavarmuuden ja täsmällisyyden arvioinnissa kahden aseman välillä (Patra, Kumar & Kråik 2010). Petri Net menetelmän käytännön soveltamiseen on olemassa useita kaupallisia ohjelmistoja.

2.3.2 Matemaattiset menetelmät ja jakautumafunktiot

Vaurioitumismallit

Rataympäristön eri komponenttien vaurioitumista voidaan kuvata yksinkertaisimmillaan lineaarisesti regressioanalyysin avulla, jolloin kunnon kehittymisen arviointi perustuu esimerkiksi aikaisempaan joko asiantuntijoilta tai mittauksista kerättyyn historiatietoon. Erilaisten matemaattisten funktioiden, kuten eksponenttifunktioiden tai differentiaaliyhtälöiden kehittäminen ja ratkaiseminen liittyy oleellisesti osana kunnon kehittymisen arvioimiseen (Holzfeind, Hummitzsch 2008).

Todennäköisyyden jakautumafunktioilla voidaan kuvata radan eri komponenttien vaurioitumisen todennäköisyyttä. Normaalijakautuma on yksinkertainen funktiomuoto, mutta sitä ei yleensä laskemissa ole käytetty. Weibull-jakautuma on yleisesti luotettavuusanalyyseissä käytetty jakautumafunktio, jonka avulla voidaan esimerkiksi kuvata radan mekaanisten tai sähköisten komponenttien eliniän tai vikaantumisvälin todennäköisyyttä. Weibull-jakautumaa kuvataan kahdella tai kolmella parametrilla. Pääparametreja ovat yleensä jakautuman muoto κ ja leveys λ . Weibull-jakautumaa käytetään muun muassa riskinarvioinnissa ja luotettavuusanalyyseissä, esimerkiksi jonkun komponentin eliniän jakautumismalleissa. Weibull-jakautuman avulla voidaan huomioida, komponentin hetkellisen vikaantumisen todennäköisyyden muuttuminen käytössä, ellei komponenttia huolleta. Weibull-jakautuman muotoparametrin κ arvo kuvaa vikataajuusfunktion tilaa, jos $\kappa < 1$ vikataajuusfunktio on vähenevä ja vastaavasti muotoparametrin ollessa > 1 vikataajuusfunktio on kasvava. Muotoparametrin saadessa arvon 1, syntyy Weibull-jakautuman erikoistapaus, puhdas eksponenttijakautuma. Myös eksponenttijakautumia tai -funktioita voidaan käyttää kuvaamaan jonkun rakenneosan vaurioitumista. Yksinkertaisia jakautumafunktiolaskelmia voidaan tehdä taulukkolaskentaohjelmilla, kuten Microsoft Excel. (Andrade 2008)

Wiener- ja Gamma-prosessit vaurioiden mallintamisessa

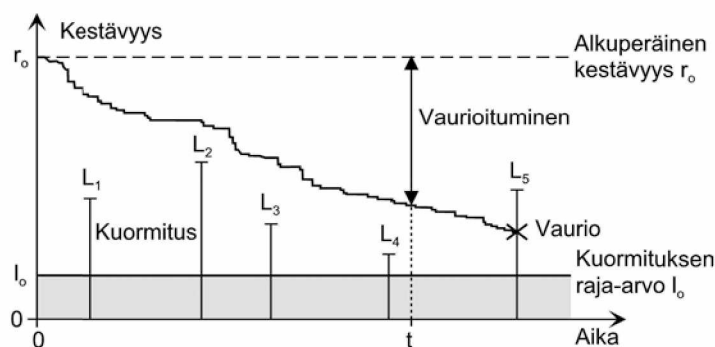
Stokastiset prosessit ovat ajan funktiona eteneviä todellisia tapahtumaketjuja kuvaavia matemaattisia satunnaishetkeä. Prosessien kulkuun liittyy aina epävarmuutta ja näin ollen prosessien tutkimiseen tarvitaan todennäköisyyslaskentaa. Stokastisia prosesseja ovat muun muassa Wiener- ja Gamma- prosessit. Prosesseille on ominaista se, että prosessien tulevaisuuteen vaikuttaa vain nykyhetken tilanne, ei se, miten kulloinkin vallitsevaan tilaan on tultu. Rataympäristön komponenttien kunnon kehittymistä voidaan käsitellä stokastisena prosessina.

Wiener-prosessissa prosessin arvon muutos on normaalijakautunut. Gamma-prosessissa inkrementit ovat toisistaan riippumattomia ja satunnaismuuttujia, joilla on gammajakautuma (sama skaalausparametri ja ajasta riippuva muotofunktio). Inkrementti voi olla esimerkiksi metallista korroosion vaikutuksesta häviävän osan massa (van Noortwijk, Kallen & Pandey 2005). Stokastisten prosessien avulla voidaan myös optimoida komponentin kunnosta riippuvaa kunnossapitoa. Optimoinnin avulla voidaan määrittää esimerkiksi ennakoivan kunnossapidon laatutaso ja se komponentin uusimisikä, jolla saavutetaan pienimmät kunnossapitokustannukset. (van der Weide, Pandey & van Noortwijk 2010)

Lyngby, Hokstad ja Vatn (2008) ovat arvioineet erilaisten analyttisten menetelmien soveltuvuutta rataympäristön mallintamiseen. Gamma-prosessilla voidaan esimerkiksi määrittää se aika, jonka jälkeen joku vaurio todennäköisesti tapahtuu. Gamma-prosessin on esitetty soveltuvan hyvin jatkuvasti etenevien vaurioiden, kuten kulumi-

sen, korroosion, eroosion ja materiaalien väsymisen kehittymisen mallintamiseen, koska se on jatkuvasti kasvava ja positiivinen funktio. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

Wiener- ja Gamma-prosessien avulla luotujen mallien ongelmana on, että ne tarkastelevat kunnon kehittymistä lineaarisesti ajan suhteen. Tämä on ongelmallista esimerkiksi tapauksissa, joissa kiskoon syntynyt murtuma etenee sitä nopeammin, mitä suuremmaksi murtuma kehittyy. Toinen mallien suurimmista ongelmista on oletus eri tekijöiden keskinäisestä riippumattomuudesta. Tämä tulee esille esimerkiksi tapauksissa, joissa jollakin rataosalla tehdään yhden rakenneosan korjaus ja oletetaan, että se ei vaikuta muiden rakenteiden toimintaan tai kunnon kehittymiseen, vaikka näin ei todellisuudessa aina ole. Prosessit soveltuvat parhaiten yhden rakenneosan kunnon kehittymisen kuvaamiseen. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

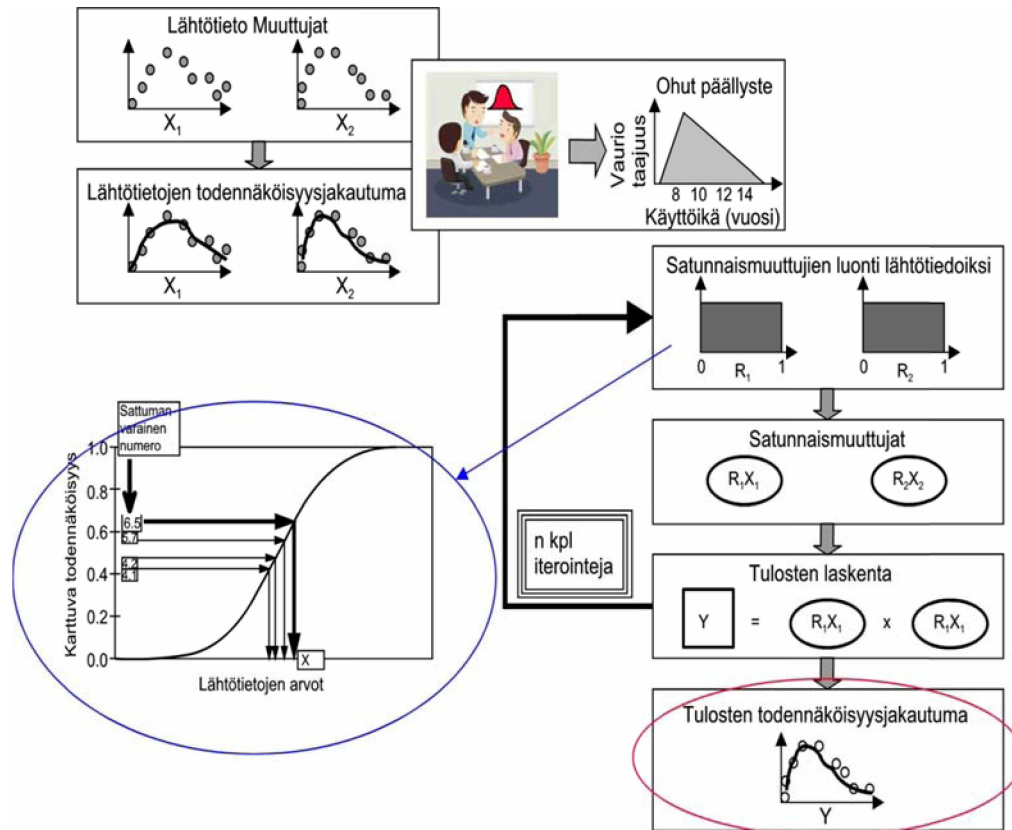


Kuva 10. Stokastinen vaurioitumisprosessi ja kuormitus. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (van Noortwijk et al. 2007). Vaurioituminen etenee ajan funktiona (todennäköisyysfunktion $X(t)$ mukaisesti), kuormituksen suuruuden (L) ylittäessä ajan funktiona heikentyneen kestävyuden syntyy vaurio.

2.3.3 Epävarmuuden ja riskien arviointi Monte Carlo simuloinnilla

Monte Carlo -simulaatio on todennäköisyyden simulointia. Tekniikan avulla voidaan arvioida luodun mallin antamien tulosten epävarmuutta tai riskiä. Simulointi sopii erittäin hyvin tilanteisiin, joissa pyritään ennustamaan tai arvioimaan esimerkiksi radan tulevaa kuntoa nyky- ja historiatiedon perusteella luodun, muutamia oletuksia ja epävarmuustekijöitä sisältävän mallin avulla. Perusperiaatteena on se, että luotuun malliin syötetään satunnaisesti valittuja arvoja ja niiden erilaisia yhdistelmiä simuloidaan useita satoja tai tuhansia kierroksia. Simuloinnin jälkeen saadaan tuloksena todennäköisyydet erilaisille lopputuloksille.

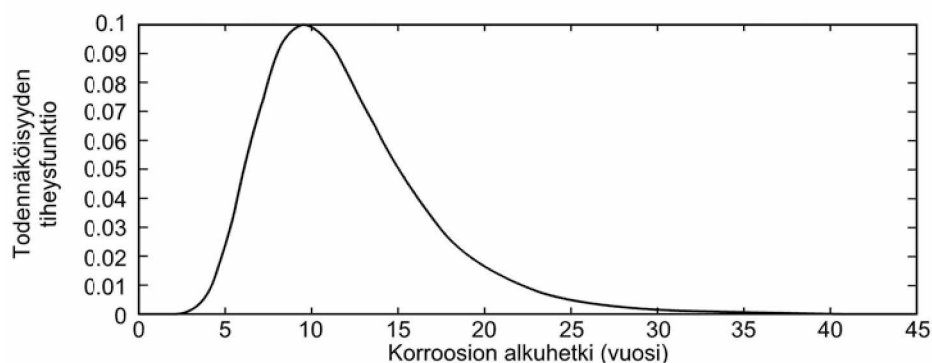
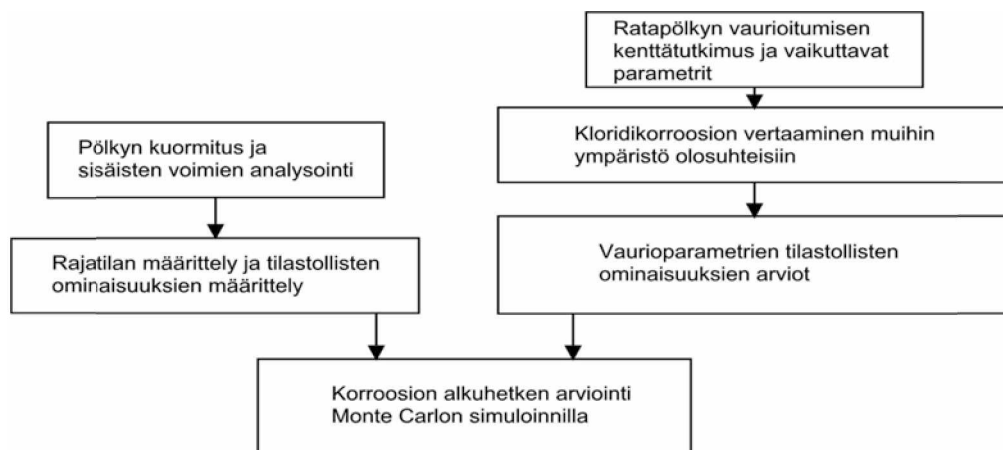
Monte Carlo -simulaatio voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on teknisten ja taloudellisten epävarmuustekijöiden määrittely asiantuntijatiedon perusteella. Toinen vaihe on usein herkkyysanalyysi, jonka avulla voidaan arvioida karkealla tasolla esimerkiksi eri parametrien vaikutusta elinkaarikustannuksiin. Kolmannessa vaiheessa määritellään todennäköisyysfunktiot, joilla voidaan parhaiten kuvata eri parametrien mahdollisia arvoja ja niiden todennäköisyyttä. Todennäköisyysfunktio voi olla esimerkiksi normaalijakautuma tai Weibull-jakautuma. Neljäs ja viimeinen vaihe on Monte Carlo -simulaation suorittaminen esimerkiksi jollakin kaupallisella ohjelmalla. Kuvassa 11 on esitetty Monte Carlo -simulaation periaatteellinen kulku. (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)



Kuva 11. Monte Carlo simulaation periaatteellinen kulku. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)

Monte Carlo -simulaation avulla voidaan siis luoda realistinen tai tyypillinen tietokone-malli rakenteen tai rakenneosan elinkaaresta. Simulaatioprosessia havainnoimalla voidaan laskea arvioita käyttäytymisestä eri ajan hetkillä. Simulaatiota käsitellään siis kuin oikeata prosessia. Simulaatiota pidetään tehokkaampana keinona kompleksisissa prosesseissa kuin analyttisiä malleja, koska analyttisten mallien kehittäminen on usein erittäin aikaa vievää. Simulaation haittapuolena voidaan kuitenkin pitää pitkiä simulaatioaikoja, kun halutaan päästä suureen tarkkuuteen. Usein simuloinnissa jotkut osa-alueet jäävät pienemmälle huomiolle kuin toiset. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

Monte Carlo -simulaatioita on käytetty esimerkiksi elinkaarilaskennan epävarmuuden arvioinnissa (Patra, Söderholm & Kumar 2009). Simulaatiota on käytetty myös tutkitessa kaluston toleranssien vaikutusta aukean tilan ulottumaan ja sitä kautta mahdollistuvaan suuremman kaluston käyttöön ja kuljetusten tehostamiseen. (O'Neill, Garner & Wood 2008). Kirjallisuudesta löytyy sadoittain esimerkkejä Monte Carlo -simulointimenetelmän käytöstä erilaisten monimutkaisten prosessien todennäköisyyden arvioinnista.



Kuva 12. Ongelmanratkaisukaavio ja todennäköisyysfunktion jakautuma ratapölkkyjen korroosion esiintymisestä. Kaavio ja kuvaaja on käännetty suomeksi julkaisusta (Mohammadzadeh, Vahabi 2011).

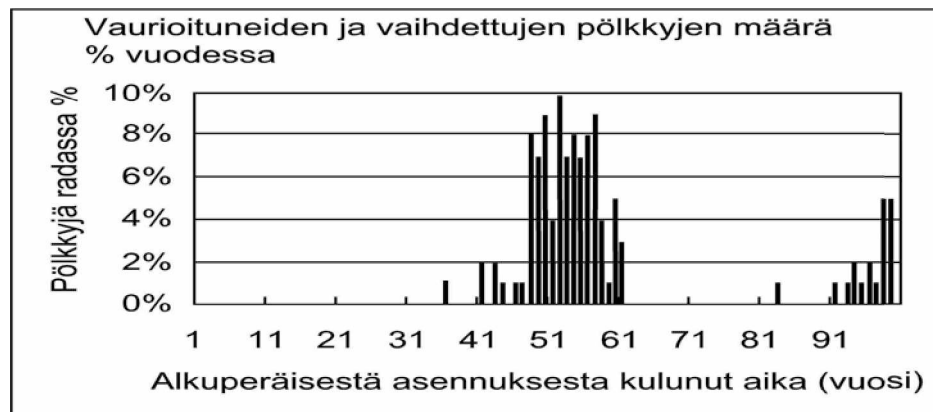
Esimerkki Monte Carlo -simuloinnin käytöstä on esitetty kuvassa 12, jossa on laskettu korroosion alkamisen todennäköisyyttä ratapölkyn alapinnassa. Esimerkissä simuloinnin tuloksena on saatu todennäköisin alkamisajankohta 5,5 vuoden päähän. Artikkelissa on esitetty myös, että esimerkiksi suojabetonikerrosta kasvattamalla on päästy korroosion alkamiseen vasta 12 vuoden kuluttua. Simuloinnissa on käytetty MATLAB ohjelmistoa. (Mohammadzadeh, Vahabi 2011)

Ratapölkkyjen vaurioitumista ja vaihdettavien pölkkyjen määrää on simuloitu Australiassa. Simulointi osoitti, että melko pienetkin lisäykset akselipainossa saattavat lyhentää pölkkyjen käyttöikää merkittävästi (kuva 13). Kun akselipaino oli 28,5 t vuosittain vaurioituneiden tai vaihdettujen pölkkyjen määrä oli vielä noin 80 vuoden kuluttua asennuksesta noin yhden prosentin luokkaa. Vastaavasti 30,5 t akselipainolla vuosittain vaurioituneiden ja vaihdettavien pölkkyjen määrä oli jo 50 vuoden jälkeen lähellä 10 %. Tutkimuksen tuloksena havaittiin myös, että pölkkyjen käyttöikään vaikuttavat merkittävästi myös muut kuin pölkkyjen staattisesta lujuudesta johtuvat tekijät. (Murray 2010)

a)



b)



Kuva 13.

Australiassa toteutettu Monte Carlo -simulaatio ratapölkkyjen vaurioitumisesta ja korvattavien pölkkyjen määrästä a) 28,5 t akselipainolla ja. b) 30,5 t akselipainolla. Kuvat on käännetty suomeksi julkaisusta (Murray 2010).

3 Kustannusten jaottelu ja rajakustannukset

Ratarakenteen taloudellisuustarkastelut vaativat yksityiskohtaista kustannustietoa investoinneista, kunnossapidosta ja hoidosta. Lisäksi välillisesti esimerkiksi kunnossapidon tai korjaamisen aiheuttamista viivityksistä aiheutuvat kustannukset tulisi huomioida taloudellisuustarkasteluissa. Taloudellisuustarkasteluissa pitäisi ottaa huomioon myös jollakin tavalla niin kutsutut positiiviset kustannukset eli jonkun toimenpiteen aikaan saamat hyödyt. Tässä luvussa käsitellään kustannusten luokittelumiseksi laadittuja kansainvälisiä suosituksia sekä Suomessa nykyisin käytössä oleva kustannusten jaottelumenettely.

Rataympäristön kustannusten jaottelusta on tehty paljon tutkimusta, mutta yleistä yhteisymmärrystä luokittelutavasta ei ole kuitenkaan saavutettu. On myös esitetty, että kulumisen ja korvausinvestointien aiheuttamat kustannukset tulisi laskuttaa radan käyttäjiltä. Nashin mukaan ratamaksut ovat esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa erittäin alhaisia verrattaessa investointikustannuksiin (Nash, 2005).

Innotrack projektissa on laadittu yhteenveto projektiin osallistuneiden organisaatioiden kustannusten luokittelusta (taulukko 1). Luokittelun pitäisi toimia myös elinkaarikustannusanalyysin pohjana. Innotrack tutkimuksen taustatyö on tehty Birminghamin yliopistossa. (Innotrack Deliverable D1.4.6 2009)

Taulukko 1. Innotrack projektissa käytetty kustannusten luokitteluperiaate (Innotrack Deliverable D1.4.6 2009)

Pääkustannus	Alaluokka
Hitsaus	Hitsien korjaus
Kiskojen hionta	
Tarkastus	Manuaalinen, vaihteet ja risteykset sekä linjaraiteet erikseen
Voitelu	
Radan uudistaminen	Kiskojen vaihto, pölkkyjen vaihto, vaihteet ja risteykset, aluslevyjen vaihto, tukikerroksen uudelleen profilointi lisäksi luokittelussa huomioidaan onko kysymyksessä linjaraide, vaihde vai risteys
Pohjamaa	Pehmeiköt
Geometria	Tukeminen: (manuaalinen tukeminen, vaihteet ja risteykset sekä linjaraiteet erikseen)
Kuivatus	Märät alusrakenteet, pehmeiköt
Pienimuotoinen säännöllinen kunnossapito	Kasvillisuuden poisto, kiskon voitelu, kiskoja-kosten kunnossapito

Euroopan komission kuudennen puiteohjelman CATRIN projektissa on koottu useammassa Euroopan maassa käytössä olevat rautateiden rajakustannusten laskentaperiaatteet ja esitetty myös rajakustannusten yhtenäistämiseen tähtääviä suosituksia. Tavoitteena on huomioida entistä paremmin eri kalustotyyppien aiheuttamat radan kulumiskustannukset. Kustannukset muodostuvat kuitenkin eri tavalla eri maissa,

joten yhtenäistä eurooppalaista järjestelmää ei ole pystytty rakentamaan. Rajakustannusten laskentaa käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.

UIC:n tekemässä tutkimuksessa on vertailtu elinkaarikustannuksia eri maissa. Mukaan vertailussa oli 12 länsieurooppalaista, 4 aasialaista ja 5 pohjoisamerikkalaista rautatietä. Tulokset on esitetty taulukossa 2. Kustannusten suuret erot johtuvat pääosin liikenteen rakenteesta, esimerkiksi USA:ssa keskimääräinen tavarajunan paino on noin 7000 t, kun vastaava luku Euroopassa on 700 t. Myös markkinatilanne, rataverkon kunto ja käyttöaste vaikuttavat kustannuseroihin. (Lichtberger 2005)

Taulukko 2. UIC:n tutkimuksen perusteella lasketut keskimääräiset elinkaarikustannukset (Lichtberger 2005).

Maanosa	Keskimääräinen elinkaarikustannus (€/r-m)	Investointien osuus (€/r-m)	Kunnossapidon osuus (€/r-m)	Keskimääräinen kustannus (€/1000t-km)
Eurooppa	57	24	33	22,9
Aasia	163	85	78	13,3
Pohjois-Amerikka	19,9	12	7,9	2,2

Kaupallisissa elinkaarikustannuslaskennan ohjelmistoissa luokitellaan kustannuksia ohjelmiston käyttötarkoituksen mukaan (kunnossapito, investoinnit jne.) kunkin ohjelmistotoimittajan tai ohjelmistoa käyttävän toimijan määrittelemällä tavalla. Esimerkiksi Zeta-Tech Ltd:n toimittama kunnossapidon optimointiin tarkoitettu TrackLife-ohjelmisto tarvitsee kustannustietoja polttoainekustannuksista, viivytyksistä tai nopeuden alentamisesta aiheutuvista kustannuksista, kiskon, vaihteiden ja sepelin yksikköhinnat sekä tiedot tukemiskustannuksista. (Bonaventura, Zarembski & Palese 2011) Useissa ohjelmistoissa tarvitaan jopa työ- tai konekustannusten tuntiveloitus, jos esimerkiksi vertaillaan vaihtoehtoisia kunnossapitotoimenpiteitä.

3.1 Kustannusten jaottelu Suomessa

Suomessa radanpidon investointikustannusten jaottelu on perustunut seuraavassa esitettyihin määrittelyihin. Liikennevirastouudistuksen myötä terminologia ja kustannusten jaottelu on kuitenkin muuttumassa. Suomessa radanpidon investoinnit on aiemmin jaettu *korvausinvestointeihin ja kehittämisinvestointeihin*. Kehittämisinvestoinnit jaettiin edelleen *laajennusinvestointeihin ja uusinvestointeihin*. Korvausinvestoinnilla tarkoitetaan rakenteen elinkaaren lopussa tapahtuvaa rakenteen uusimista. Tyypillinen korvausinvestointi on ollut radan perusparannus, jossa radan rakenne tietyltä rataosalta uusitaan tai parannetaan. (Ratahallintokeskus 2004) Laajennusinvestointeihin kuuluvat muun muassa tasoylikäytävien poistaminen, radan sähköistys,

ohitus- ja kohtausraiteiden rakentaminen, radan kulunvalvontajärjestelmien rakentaminen, liikennepaikkojen rakentaminen ja radan melunsuojauksen rakentaminen. Rataverkon *uusinvestoinnit* ovat harvoin toteutettavia hankkeita, joiden vaikutukset voivat olla hyvinkin laajoja ja moninaisia. *Ylläpitoinvestoinneiksi* kutsuttiin kustannuksiltaan vähäisiä toimenpiteitä, joilla uusittiin ratarakenteita vastaavilla materiaaleilla. Tyypillisiä olivat siltojen ja rumpujen ylläpitoinvestoinnit. Investoinneissa käytetään usein kierrätysmateriaaleja. Ylläpitoinvestoinniksi laskettiin muun muassa ratapihan yhden raiteen pölkkyjen uusinta tai muutamien kuluneiden vaihteiden vaihto. (Ratahallintokeskus 2006)

Liikennevirastouudistuksen myötä investointien jaottelua on selkeytetty ja jatkossa käytetään vain termejä *uus-* ja *laajennusinvestointi* ja *korvausinvestointi*. Liikenneviraston vuoden 2011 lopulla julkaisemassa hankearviointiohjeessa investoinnit on määritelty seuraavasti: *korvausinvestointi* on väylän korjaamista rakenteellisen kunnan säilyttämiseksi, *laajennusinvestointi* on väylän tai sen osan toimivuuden parantamista ja *uusinvestointi* on uuden väylän rakentamista. (Liikennevirasto 2011a)

Peruskunnossapidolla tarkoitetaan päivittäistä kunnossapitoa, varautumista ja vian korjausta, johon ei sisälly investointia. *Muu kunnossapito* on peruskunnossapitoon kuulumatonta elinkaaren aikaista korjaavaa ja uusivaa kunnossapitoa, joka tilataan aina erikseen. Kunnossapidon toimenpiteet määritellään yksityiskohtaisesti Liikenneviraston ja kunnossapitajan välisessä sopimuksessa. (Liikennevirasto 2010a)

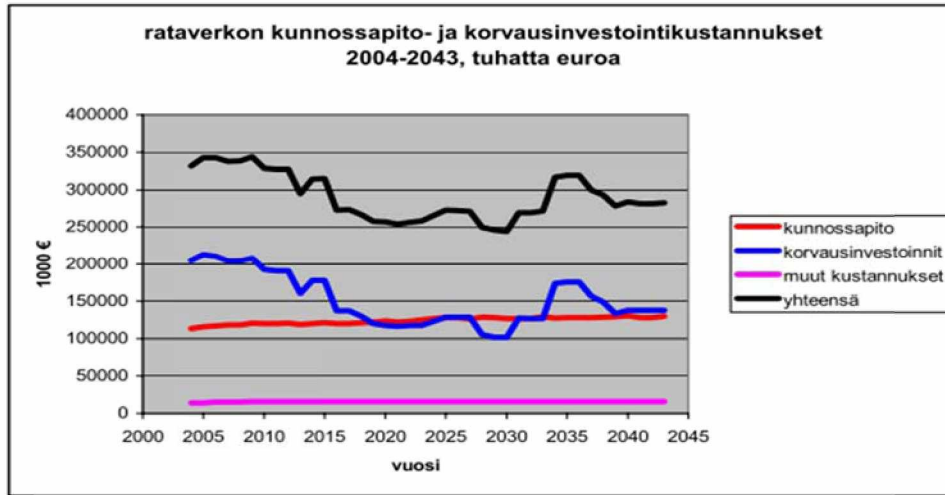
Ratarakenteen *hoidon* toimenpiteitä ovat määräaikaishuollot, viankorjaukset sekä talvella lumityöt. Suomessa myös radan *tarkastustoiminta* on luokiteltu hoidon toimenpiteeksi. (Ratahallintokeskus 2006)

Liikennevirastouudistuksen myötä myös kunnossapidon terminologiaa ja määrittelyjä on uudistettu. *Ylläpidoksi* kutsutaan toimenpiteitä, joilla olemassa olevaa rakennetta korjataan ja niiden kunto ja toimivuus palautetaan ennalleen. Olosuhde-, kunto- ja infratietojen hankinta ja ylläpito ovat myös ylläpidon toimenpiteitä. Vastaavasti *hoidoksi* määritellään toimenpiteet, joita tarvitaan säännöllisesti väylän tai sen rakenteen pitämiseksi toimintakunnossa. Hoitoon kuuluvat muun muassa isännöinti ja väylästäön valvonta. (Liikennevirasto 2011c)

Suomessa rataverkon kunnossapitoon käytetään vuosittain noin 145 miljoonaa euroa. Kunnossapitoa hankitaan seuraavilta alueilta: radan päällysrakenne, sähkörata- ja sähkövoimatekniikka, turvalaitejärjestelmät, tietoliikennejärjestelmät, asema- ja laiturialueet, kiinteistöt sisältäen LVIA (lämpö-, vesi- ja ilmastointiautomaatio) ja erikoisjärjestelmät (kaluston valvontalaitteet). Suomen rataverkko on jaettu 12 kunnossapitoalueeseen. Kunnossapitoon sisältyviä korjaustoimenpiteitä ovat ratapölkkyjen hajavaihdot, kuluneiden kaarrekiskojen vaihdot, vaihteen osien vaihtaminen sekä järjestelmien osien, kuten turvalaitosten komponenttien uusimiset. (www.liikennevirasto.fi, luettu 16.11.2010).

Tuominen on julkaisussaan (Tuominen 2004) selvittänyt rataverkon kunnossapidon ja uusimisen rahoitustarvetta sekä radan komponenttien elinkaarikustannuksia vuosina 2004-2043. Työssä on kerätty kustannustietoa rautatiealan julkaisuista ja toteutuneista hankkeista sekä haastatteleamalla suomalaisia alan asiantuntijoita. Kustannukset on jaoteltu rakenneosittain, minkä lisäksi on laskettu kunnossapidon kustannuksia. Kustannukset on laskettu nauhakustannuksina eli keskimääräisinä kustannuksina raidekilometrin matkalla, vaikka kustannukset olisivatkin syntyneet yhdestä rataosan

kohteesta. Kustannukset on esitetty vuoden 2003 rahan arvon tasossa. Tutkimuksen tuloksena on saatu kokonaisarvio tarkasteluvuosien aikana tarvittavasta radanpidon rahoituksesta (kuva 14).



Kuva 14. Radanpidon kunnossapito- ja korvausinvestointikustannukset (Tuomi-nen 2004)

3.2 Ratamaksut ja rajakustannukset

EU:ssa on käytössä periaate, jonka mukaan rautatieliikenteeltä tulee periä vähintään maksu, joka kattaa välittömästi liikennesuoritteesta aiheutuvat radanpidon kustannukset. (2001/14/EY)

Suomessa ratamaksu määräytyy radan kulumisen rajakustannusten perusteella. Ratamaksu koostuu perusmaksusta ja rataverosta. *Rajakustannus on kustannusten muutos, jonka aiheuttaa liikenteen lisäys yhdellä suoriteyksiköllä.* Maksut peritään erikseen tavaraj- ja henkilöliikenteen bruttotonnikilometrisuoritteiden perusteella (taulukko 3). Ratamaksun perusosa jää radanpitäjän käyttöön, mutta vero ohjataan valtion kassaan. Perusmaksun vuotuinen kokonaissumma on ollut noin 40 M€ ja ratavero noin 15 M€. Suoritteiden vaikutus radanpidon kustannuksiin määritellään estimoimalla radanpidon kustannusfunktioita. (Tervonen, Pekkarinen 2007)

Osa radan kunnan kehittämisestä voi olla myös liikenteestä riippumatonta, esimerkiksi ratapölkkyt ja kiviaines rapautuvat ajan myötä ja esimerkiksi kasvillisuus voi heikentää täysin liikennöimättömän radan kuntoa. Yleensä ratamaksun määräytymisen perusteena käytetään kunnossapitokustannuksia ja korvausinvestointikustannuksia. Useimmissa taloudellisuustarkasteluissa ratamaksuja määrittäessä käytetään liikennemäärän mittarina bruttotonnikilometriä, eikä erotella junatyyppejä toisistaan. (Nash 2005)

Suomessa ratamaksut määräytyvät vain bruttotonnikilometrien mukaan, mikä on käytäntönä myös monissa muissa Euroopan maissa. Nashin (2005) mukaan ruuhkamaksut tai esimerkiksi kalustoresurssien riittämättömyys eivät ole oleellisia, kun ratamaksuja optimoidaan sellaisissa maissa, joissa ei ole kilpailua, kuten esimerkiksi Suomessa. Nash ehdottaa artikkelissaan kaksitasoista tariffia, jossa on kiinteä ja muuttuva osa. Kiinteä kustannus edustaa välttämätöntä kustannusta, jotta rataverkko

on operaattorin käytettävissä puitesopimuksen mukaisesti ja muuttuva osa vastaa radan käytöstä tulevia kustannuksia. Toisin sanoen operaattorit voisivat ostaa lyhytaikaista käyttöä muuttuvalla kustannuksella, mikä ei kuitenkaan takaa pitkäaikaista pääsyä rataverkolle. (Nash 2005)

Taulukko 3. Vuoden 2011 alussa Suomessa voimassa olevat ratamaksut ja ratavero. (http://www.rhk.fi/radan_kaytto/rataverkolle_paasy/ratamaksu/, (luettu 8.2.2011))

Ratamaksun perusmaksu		
Tavaraliikenne	Henkilöliikenne	
0,135 senttiä/Br-t-km	0,1308 senttiä/Br-t-km	
Ratavero		
Tavaraliikenne sähkövetoinen	Tavaraliikenne dieselvetoinen	Henkilöliikenne
0,05 senttiä/Br-t-km	0,1 senttiä/ Br-t-km	0,01 senttiä/Br-t-km

Lisäksi rataosalta Kerava-Lahti peritään investointiveroa (31.8.2021 saakka) sekä tavara-liikenteeltä että henkilöliikenteeltä 0,5 senttiä/bruttotonnikilometri

Ratamaksu suoritetaan Liikennevirastolle jälkikäteen laskutuksen mukaisesti kalenterikuukausittain toteutuneiden suoritteiden perusteella. Rautatieliikenteen harjoittajan on laskutusta varten ilmoitettava Liikennevirastolle kuukausittain tiedot harjoittamastaan liikenteestä.

3.2.1 Rajakustannukset Suomessa

Rajakustannuksella tarkoitetaan radanpidon kustannusten muutosta, joka aiheutuu liikenteen lisääntymisestä yhdellä suoriteyksiköllä. Suoritteiden vaikutus radanpidon kustannuksiin määritellään estimoimalla radanpidon kustannusfunktioita ja laske-malla sen perusteella radan kulumisen rajakustannus. Kustannusfunktiot ovat tilas-tollisia malleja ja kustannukset muodostuvat muuttuvista radanpidon kustannuksista toisin sanoen kunnossapidosta ja korvausinvestoinneista. Suomessa kustannusfunk-tioksi on valittu Cobb-Douglas -kustannusfunktio. Kustannusfunktion valinnan perus-lähtökohtana on radanpidon kustannuksiin vaikuttavien muuttujien valinta. Lähtökoh-taiseksi ongelmaksi muodostuukin nimenomaan se, että kaikille muuttujille ei ole olemassa numeerista arvoa, näin ollen esimerkiksi rataverkon kaikkien teknisten omi-naisuuksien vaikutusta rajakustannukseen ei voida kattaa. (Tervonen, Pekkarinen 2007)

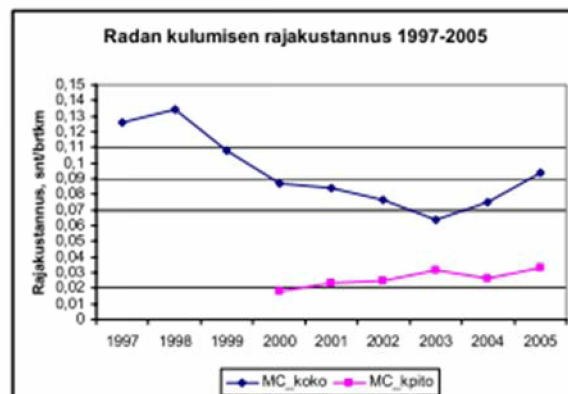
Suomessa ei hinnoitella liikenteenohjauksen kustannuksia tai ratakapasiteetin niukuutta, kuten tehdään useissa Euroopan maissa. Ratakapasiteettia ei ole hinnoiteltu, koska liikennöinti on käytännössä vain yhden liikennöijän vastuulla. Selvityksessään Tervonen ja Pekkarinen tarkastelevat perusmaksun suuruutta ja lisäksi selvittävät maksujen soveltamista ratapihojen liikenteeseen. Rajakustannuksia tarkastellaan muutamien vuosien välein ja niihin tehdään tarvittaessa muutoksia. (Tervonen, Pekkarinen 2007). Liikennevirasto julkaisee vuoden 2012 alussa päivitetyn selvityksen radan kulumisen rajakustannuksista.

Tervonen ja Pekkarinen toteavat raportissaan, että radanpidon kustannuksia selittäviä muuttujia ovat rataosan liikennemäärä ja rataosan raidepituus. Tutkijoiden käytössä olleen aineiston perusteella laskettiin rajakustannuksia ja ratamaksuja erikseen kunnossapitokustannusten ja korvausinvestointien perusteella. Rajakustannusten laskemiseksi Suomen rataverkko jaettiin 90 osaan, joille laskettiin erikseen rajakustannus. Laskennan tuloksena saatiin rataosittain jopa monikymmenkertaisesti vaihtelevia kustannuksia. Jotta voitiin laskea koko rataverkolle yksi rajakustannus, laskennan tuloksia painotettiin rataosan liikennemäärän suhteellisella osuudella koko rataverkosta. Lopputuloksena saatiin arvio siitä, kuinka paljon muuttuvia kustannuksia aiheutuu yhtä etäisyysperusteista suoriteyksikköä kohti kullakin rataosalla. Kustannusjoustokerroin kuvaa muuttujan vaikutusta selittävään tekijään. Jos esimerkiksi liikennemäärän joustokerroin on 0,2 se tarkoittaa, että bruttotonniin määrän kasvu yhdellä prosentilla lisää muuttuvia kustannuksia 0,2 %. Suomessa koko rataverkolle laskettu joustokerroin on 0,2. (Tervonen, Pekkarinen 2007)

Radan kulumisen rajakustannusten laskentaa varten kustannukset jaotellaan kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin taulukon 4 mukaisesti. Suomessa muuttuviin kustannuksiin kuuluvat kaikki ratalinjalla tapahtuvat kunnossapitotyöt. Liikenteen ohjauksen ja kulunvalvonnan kustannuksia ei lasketa muuttuviin kustannuksiin. Taulukon 4 mukainen kustannusten jaottelu perustuu EU komission suositukseen ja on tarkoitettu lyhyen aikavälin tarkasteluihin. Suomessa käytössä olevan kustannusten jaottelu mahdollistaa kunnossapidon ja korvausinvestointien rajakustannusten erittelyn. (Tervonen, Pekkarinen 2007)

Suomessa radan kulumisen rajakustannukset (vuosien 1997-2005 aineistosta laskettuna) koko rataverkolle ovat 0,07-0,14 snt/bruttotonnikilometri. Kunnossapidon rajakustannukset ovat 0,019-0,026 snt/bruttotonnikilometri. Edellä esitetty kuvaa korvausinvestointien määräävää roolia muuttuvien kustannusten muodostumisessa. Tervonen ja Pekkarinen toteavat raportissaan, että kustannusfunktioita tulisi kehittää muuttujilla, jotka kuvaavat rataosien teknisiä ja laadullisia eroja. Erilaisen junakaluston rataa kuluttavaa vaikutusta ei kuitenkaan pystytä kustannuksissa huomioimaan.

Kuvaan 15 on koottu suomalaiset rajakustannukset vuosilta 1997-2005. Rajakustannuksissa näkyy selkeä laskeva trendi, lukuun ottamatta vuonna 2005 tapahtunutta rajakustannuksen lievää kasvua. Laskeva trendi voi johtua esimerkiksi liikennemäärien kasvamisesta. Kunnossapidon rajakustannuksissa on vastaavasti havaittavissa selkeä nouseva trendi. (Tervonen, Pekkarinen 2007)



Kuva 15. Radan kulumisen rajakustannukset Suomessa. (Tervonen, Pekkarinen 2007)

Taulukko 4. Suositukset radanpidon kustannusten jakamiseen kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Taulukko on muokattu julkaisusta (Tervonen, Pekkarinen 2007)

Kustannustekijä	Kiinteä	Muuttuva
Maan hankinta	Kyllä	Ei
Uusien ratojen rakentaminen	Kyllä	Ei
Olemassa olevien ratojen tason nosto ja laajentaminen	Kyllä	Ei
Korvausinvestoinnit		
Suuret korjaukset		
- perusparantaminen ilman kehittämistä	Osittain	Osittain
- siltojen tunneleiden, vaihteiden ja laiturien suuret korjaukset, jotka tehdään esim. kerran 30 vuodessa	Osittain	Osittain
Uusiminen		
- siltojen, tunneleiden, vaihteiden ja laiturien sekä raiteiden uusiminen, joka palauttaa käyttöarvon ennalleen	Osittain	Osittain
Rakenteiden kunnossapito		
- siltojen ja teknisten laitteiden pienet korjaukset	Ei	Osittain
- sepelin puhdistus, tiivistys	Ei	Osittain
Jatkuva kunnossapito ja käyttö		
- talvikunnossapito (vaihteiden puhdistus ja auraus)	Kyllä	Osittain
- raiteiden puhdistus ja kasvuston harvennus	Kyllä	Ei
- tarkastukset	Kyllä	Osittain
- siltojen tukilaattojen ja turvalaitteiden huolto	Kyllä	Ei
- liikenteenohjaus	Pääasiassa ei	Kyllä
Hallinto		
- yleiskulut	Kyllä	Ei
- poliisi	Ei	Kyllä
- aikataulusuunnittelu	Ei	Kyllä

Taulukon 4 mukainen jaottelu ei ole täysin yksiselitteinen, koska esimerkiksi lumen aurauksella ei kaikeksi ole todellista suoraa vaikutusta radan kulumiseen, vaikka kustannus onkin selkeästi muuttuva. Vastaavasti radan tarkastustoiminta luokitellaan kiinteäksi kustannukseksi eli se ei vaikuta rajakustannusten laskentaan. Tarkastuksia ja niiden väliaikoja on kuitenkin kirjallisuuden mukaan mahdollista optimoida ja näin ollen vaikuttaa syntyviin kustannuksiin. Se mikä osa ratarakenteen kunnossapidosta ja sen kustannuksista luetaan kuuluvaksi rajakustannusten laskentaan ja mikä osa ei kuulu, jää myös hieman epäselväksi.

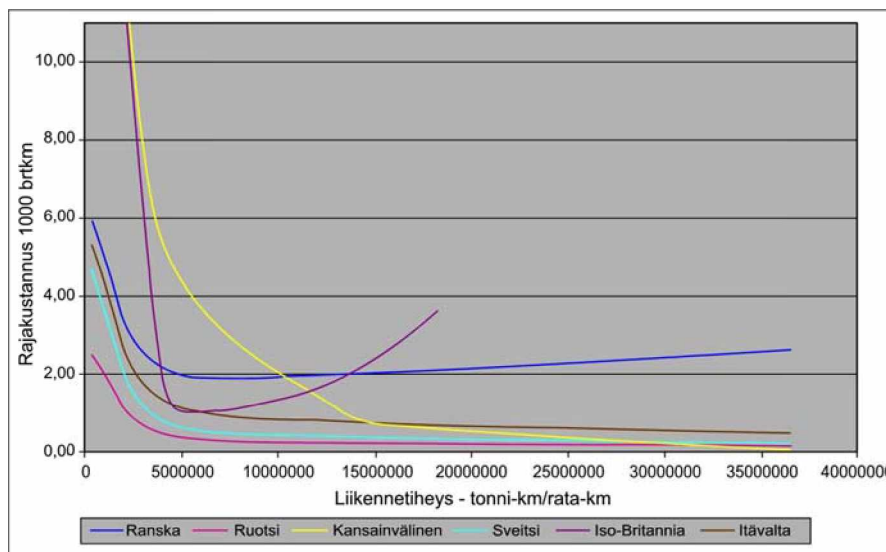
3.2.2 Rajakustannukset ja kustannusfunktiot muualla Euroopassa

Euroopan Unionin kuudennen puiteohjelman CATRIN tutkimusprojektissa on selvitetty koko liikennesektorin eri liikennemuotojen kustannusten jaottelua ja rajakustannusten laskentaa seitsemässä Euroopan maassa. Nykyisin käytössä olevat rajakustannusten laskentamenetelmät voidaan jakaa ekonomistiseen tai tekniseen lähestymistapaan.

Niin kutsuttu *top-down* on ekonomistinen lähestymistapa, joka perustuu olemassa olevien kunnossapito- ja korvausinvestointikustannustietojen käyttöön ja kustannusten vaihteluun liikennemäärän mukaan. Menettely voidaan toteuttaa määrittelemällä kustannusfunktio tai luokittelemalla kustannukset erilaisten toimenpiteiden mukaisiin luokkiin ja sen jälkeen teknisen tiedon perusteella arvioida liikenteen vaikutusta näihin kustannuksiin. Ekonomistista lähestymistapaa pidetään käytännöllisempänä ja helpommin käyttöönotettavana.

Toinen lähestymistapa on niin kutsuttu *bottom-up* menettely, joka perustuu tekniseen tietoon liikenteen aiheuttamasta radan komponenttien kulumisesta. Periaatteessa tällä menetelmällä saadaan todellinen tieto liikennesuoriteyksikön aiheuttamista kustannuksista, mutta valitettavasti radan komponenttien kulumisen mallit sisältävät oletuksia, eivätkä näin ollen välttämättä kata kaikkia kulumisen aiheuttamia kustannuksia. Euroopassa käytetään enimmäkseen ekonomistista lähestymistapaa, tosin muutamissa maissa (Ruotsi, Iso-Britannia ja Sveitsi) on pyritty huomioimaan laskennassa radan eri komponenttien (kisko ja raidesepeli) kunnan kehittymisen funktioita ja painoltaan erilaisen kaluston vaikutusta esimerkiksi kulumiseen. (Link et al. 2008)

CATRIN-tutkimuksessa on keskitytty kunnossapidon, käytön ja korvausinvestointien kustannusten jaotteluun. Tutkimuksen tuloksena todetaan muun muassa, että kvantitatiivisten analyysien tekeminen on haastavaa, koska osasta kustannuksia ei ole saatavissa yksityiskohtaista tietoa. Kustannusten laskenta edellyttää yleensä erittäin suurta panostusta kustannusten selvittelyyn erilaisista tietokannoista ja muista lähteistä. Eräs tutkimuksen tärkeimmistä tuloksista oli tieto rajakustannusten vaihteluista eri maiden välillä (kuva 16). (Link et al. 2008)



Kuva 16. Rajakustannukset viidessä Euroopan maassa verrattuna kansainväliseen keskiarvoon. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Wheat, Smith & Nash 2009).

Kustannusten joustavuus tarkoittaa esimerkiksi rajakustannuksen ja keskimääräisten kokonaiskustannusten suhdetta. CATRIN-projektissa tutkittujen esimerkkien perusteella laskettu keskimääräinen rataympäristön kokonaiskustannusten joustokerroin on alle 0,5, mikä tarkoittaa, että 10 % nousu bruttotonneissa mitattuna lisää muuttuvia kustannuksia alle 5 %. Radan käyttöön suhteutetuissa kustannusten joustokertoimissa on myös maakohtaisia eroja. Useimmissa toteutetuissa laskelmissa kustannukset pienenevät (kustannusfunktio on laskeva), kun radan käyttö kasvaa, mutta myös päinvastaisia tuloksia (kustannusfunktio on nouseva) on saatu esimerkiksi Itävallassa ja Saksassa. Rataympäristössä rajakustannukset ovat erittäin suuret silloin kuin liikennemäärä on pieni, mutta pienenevät huomattavasti ja nopeasti käytön lisääntyessä. Rajakustannusten määrittelyissä käytetyt menetelmät eivät vielä yhdesäkään tapauksessa pysty erottelemaan tai ennustamaan eri kalustotyyppien vaikutusta kustannuksiin. (Link et al. 2008)

CATRIN-projektissa laadittiin joukko suosituksia rajakustannusten määrittelemiseksi. Rajakustannusten joustokertoimen tulisi olla erilainen eri rataosille riippuen liikennemäärästä, mikä tarkoittaa että rajakustannukset tulisi määritellä nykyistä tarkemmin rataverkon eri osille. Korvausinvestoinneille suositellaan joustokerrointa 0,35 ja kunnossapidolle kolmea kerrointa 0,2, 0,3 ja 0,45 (taulukko 5). Pienin joustokerroin on rataosille, joissa on pieni liikennemäärä ja suurin kerroin rataosille, joissa on suuri liikennemäärä. (Lindberg 2009)

Taulukko 5 Liikennemäärän mukaan suositellut kunnossapidon joustokertoimet, taulukko on käännetty suomeksi julkaisusta (Wheat, Smith & Nash 2009)

Liikennemäärän luokka	Pieni	Keskimääräinen	Suuri
Liikennemäärä bruttotonnikm/raidekm vuodessa	< 3 000 000	3 000 000...10 000 000	> 10 000 000
Suosittelun joustokerroin	0,2	0,3	0,45

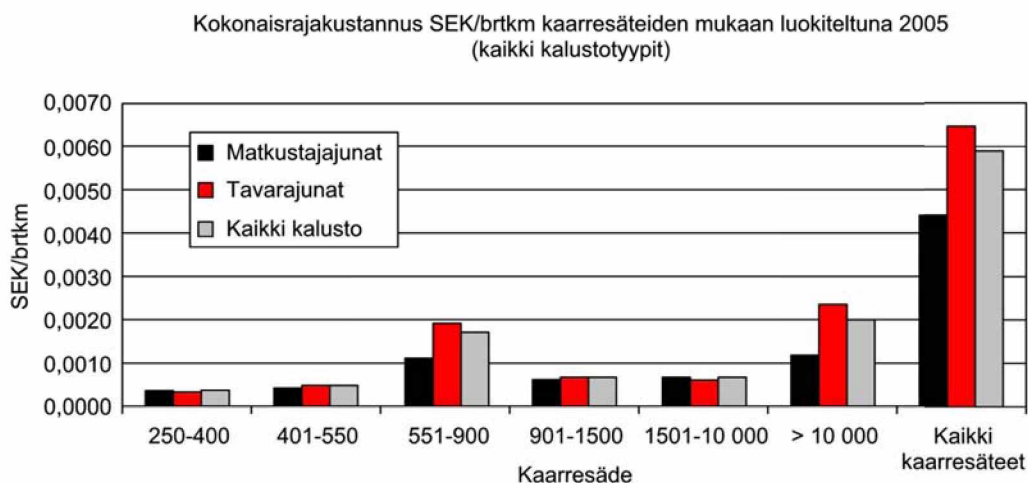
CATRIN-projektissa tutkittiin myös erilaisten kustannusfunktioiden vaikutusta laskentatuloksiin. Itävallassa tehty kunnossapitokustannusten laskenta perustuu kolmen vuoden aikana kerättyyn kustannustietoon ja rataverkolta saatuu mittaustietoon. Koska aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että korvausinvestointien kustannukset aiheuttavat ongelmia laskemisessa, esimerkkitapauksessa on keskitytty vain kunnossapitokustannuksiin. Tutkimuksessa on kokeiltu erilaisia kustannusfunktioiden muotoja (Cobb-Douglas, Translog ja Box-Cox) ja testattu erilaisten rataverkon ominaisuuksien vaikutusta kunnossapitokustannuksiin sekä liikennemäärän ja kustannusten suhteeseen. Tutkimuksen tuloksena on saatu arviot kunnossapitokustannusten joustoista ja Itävallan rataverkon raja-kustannuksista. Itävallassa on tehty myös uusia laskelmia vuosien 2005-2007 aikana kerätyistä tiedoista. Tehdyn tutkimuksen mukaan suositeltavin kustannusfunktio olisi Box-Cox, vaikka sillä saadaankin suuremmat rajakustannukset (0,0012 €/brt-km) ja joustokerroin (0,55). (Link 2009)

Ruotsissa on tehty tutkimusta ja laadittu järjestelmä liikkuvan kaluston ominaisuuksiin perustuvasta rataverkon käyttömaksusta. Käyttömaksun perustana on radan kunnon kehittymisen malli, joka koostuu neljästä mekanismista: radan painuminen, rakenneosien väsyminen, kuluminen ja vierintäväsyminen. Ruotsalaisten tutkimusten

mukaan nämä neljä mekanismia ovat tärkeimmät, kun määritetään rajakustannuksia radan kunnossapidolle ja uusimiselle. (Öberg, Andersson & Gunnarson 2007)

Ruotsalaisten keskimääräiset rajakustannukset olivat Öbergin (2007) mukaan keskimäärin 0,0056 SEK/Brt-km (noin 0,06 snt/Brt-km) vuonna 2001, jota on käytetty laskentaa varten kehitetyn DeCAyS-sovelluksen referenssivuotena. Ohjelmiston avulla on määritetty rajakustannuksia eri veturityypeille, lisäksi kustannuksia on luokiteltu myös radan kaarteisuuden mukaan (kuva 17). Ohjelmistolla voidaan laskea myös rajakustannusten eroja esimerkiksi eri veturi- tai vaunu- ja telityyppien välillä. (Öberg, Andersson & Gunnarson 2007)

Johansson ja Nilsson (2004) ovat vertailleet Suomen ja Ruotsin rajakustannuksia 1990-luvun loppupuolelta saaduilla kustannustiedoilla. Tutkimuksessa on laskettu kunnossapidon rajakustannuksia. Kustannukset on laskettu Translog-kustannusfunktiolla. Tutkimuksen päätuloksina on todettu, että käytetty kustannusfunktio soveltuu tarkoitukseensa ja käytetyn mallin selitysaste on korkea. Tutkimuksen mukaan liikennemäärän vaikutus kustannuksiin Suomessa on vähemmän määräävä kuin Ruotsissa. Suomen käyttömaksun määräävät rajakustannukset olivat tuolloin käytetyn kustannustiedon perusteella 90 % suuremmat kuin Ruotsissa. Selittäväksi tekijäksi on arvioitu olosuhteita (pidempi talvi) ja rataverkoston rakennetta. (Johansson, Nilsson 2004)



Kuva 17. Rajakustannuksen määräytyminen erilaisten kaarresäteiden perusteella Ruotsin rataverkolla. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Öberg, Andersson & Gunnarson 2007).

3.3 Kunnossapitokustannukset

Rataverkon kunnossapito luokitellaan useissa Euroopan maissa ennakoivaan ja korjaavaan kunnossapitoon. Joissakin maissa ennakoivaan kunnossapitoon luetaan kuuluvaksi myös korvausinvestointeja, kuten esimerkiksi pölkkyjen, sepelin, kiskon tai kiskonkiinnitysten uusimista. Korjaavaksi kunnossapidoksi luokitellaan esimerkiksi vauriosta johtuva kiskon uusiminen. Ennakoivaksi kunnossapidoksi luokitellaan esimerkiksi Ruotsissa kiskon hionta, raiteen tukeminen, kiskon voitelu, sepelin puhdistus ja radan tarkastus (taulukko 6). (Patra, Söderholm & Kumar 2009). Järjestelmien ja tietokantojen kehittyessä ollaan myös siirtymässä edellä mainitusta jaottelusta niin kutsuttuun kuntoon perustuvaan kunnossapitoon eli kunnossapito kohdennetaan

radan jatkuvan osin automaattisen monitoroinnin perusteella. (García Márquez et al. 2008)

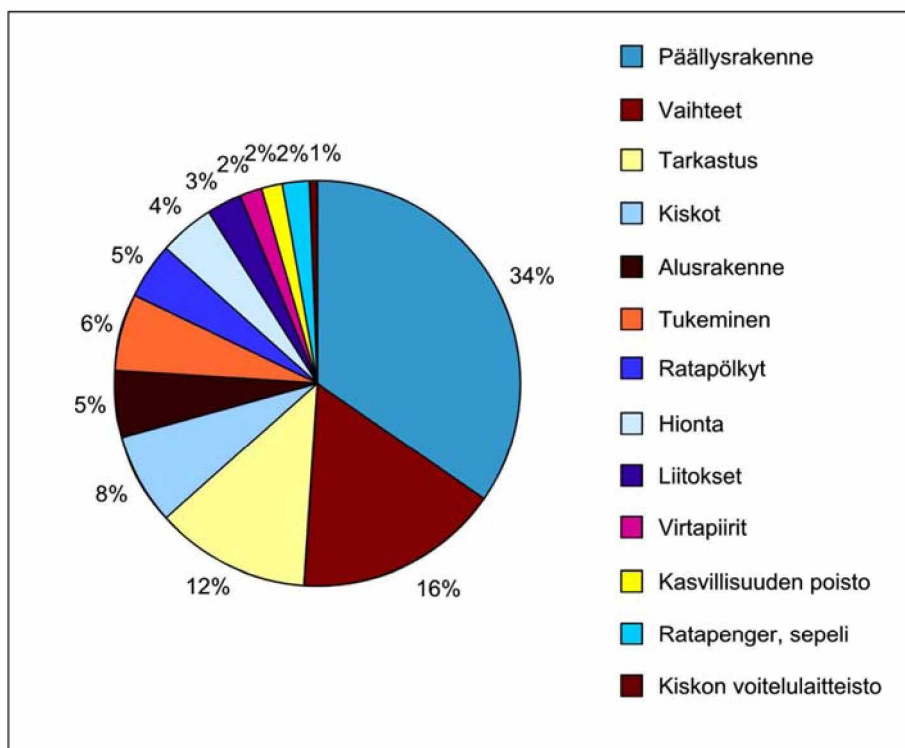
Taulukko 6. Ruotsalaisten käyttämä kunnossapidon luokittelu. Taulukko on käännetty julkaisusta (Patra, Söderholm & Kumar 2009).

Kunnossapitostrategia	Kunnossapitotoimenpide	Kunnossapitotarpeen määräävä tekijä
Ennakoiva kunnossapito	Kiskojen hionta	Aika
	Tukeminen	Kunto
	Kiskojen voitelu	Aika
	Sepelin puhdistus	Kunto
	Radan tarkastus	Aika
Korvausinvestointi	Kiskon uusiminen	Kunto
	Sepelin uusiminen	Kunto
	Pölkkyjen uusiminen	Kunto
	Kiskonkiinnitysten uusiminen	Kunto
Korjaava kunnossapito	Kiskon vaihtaminen	Vika

UIC:n tutkimuksen mukaan kunnossapitokustannusten jaottelumenettelyissä on suurta vaihtelua eri maissa. Innotrack tutkimuksessa päädyttiin (tästä hajonnasta osittain johtuen) käyttämään Network Railin käyttämää kunnossapitokustannusten jaottelua (taulukko 7). Esitettyä jaottelua suositellaan käytettäväksi pohjana eri maissa tehtäville kustannusjaottelulle. Kustannukset on jaettu kolmeen pääryhmään, joiden pääotsikot ovat ratalinjalla tehtävät toimenpiteet, ratarakenteen ulkopuoliset työt sekä signaalijärjestelmiin ja risteysiin liittyvät työt. Projektin kunnossapitokustannusten jaottelussa on pyritty yhtenäisyyteen, toisin sanoen esimerkiksi lumenpoistoa ei ole nimetty erikseen, koska se oli tarpeellinen luokka vain osassa osallistujia maita. (Innotrack D1.4.9 Guidance note 2009)

Taulukko 7. Network Railin kunnossapitotoimenpiteiden yleinen jaottelu, jota hyödynnettiin myös Innotrack tutkimusprojektissa. Taulukko on muokattu ja käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack D1.4.9 Guidance note 2009). Työkoodit on jätetty pois ja mailit ja jaardit on muutettu SI-yksiköiksi.

Toimenpide	Mittayksikkö	Toimenpide	Mittayksikkö
Ratalinjalla tehtävät työt		Ratarakenteen ulkopuolella tehtävät työt	
Kiskon ultraäänitarkastus	Raide km	Kasvillisuuden kuivatuksen ja aitojen tarkastukset	Kilometri
Kiskon vaihto	Raide m	Tasoristeysten tarkastus	Lukumäärä
Yksittäinen ratapölkyn vaihto	Pölkkyjen lukumäärä	Aidat ja tukiseinät	Metri
Tukeminen	Rata km	Kuivatus	Metri
Stoneblowing	Rata km	Kasvillisuuden hoito	Metri
Manuaalinen tukikerroksen uusinta	Lukumäärä	Tasoristeykset	Lukumäärä
Vaihteiden ja risteysten tukeminen	Lukumäärä	Tasoristeysten korvaaminen eritasoisiksi	Lukumäärä
Vaihteiden ja risteysten uusiminen	Lukumäärä	Merkit	Lukumäärä
Koneella tehtävä yksittäisten pölkkyjen uusinta	Pölkkyjen määrä	Jäteastiat	Laituri
Vaihteiden ja risteysten pölkkyjen	Lukumäärä	Asema-alueen ulkopuolien jätehuolto	Sijainti
Vaihteiden ja risteysten kiskojen hitsauskorjaukset	Korjausten määrä	Graffitit	Sijainti
Radan tarkastus (taso 1)	Tarkastus-km	Ratalinjan läheisten puiden poisto	Lukumäärä
Koneellinen radan tarkastus	Tarkastus-km	Ratatyökoneella tehtävä kasvillisuuden poisto	Kilometri
Vaurioituneiden kiskojen hitsausten korjaukset	Korjausten määrä	Signaalijärjestelmät ja liikenne	
Ratageometrian manuaalinen korjaus	Ratametri	Rutiini kunnossapito	Huolto
Manuaalinen tukikerroksen muotoilu	Ratametri	Signaalijärjestelmien kunnossapito	Huolto
Materiaalien kuljetus	Tunti	Junan tunnistimet	Huolto
Tukikerroksen uusiminen (manuaalinen)	Tonni	Muut toimenpiteet	Huolto
Tukikerroksen uusiminen (koneellinen)	Tonni	Tasoristeykset	Huolto
Kiskon voitelujärjestelmän huolto	Yksittäinen toimenpide	Suojastus	Huolto
Kiskonkiinnitysten uusiminen	Pölkkyjen lukumäärä	Turvalaitteet	Huolto
Muut toimenpiteet	Vaihtelee		



Kuva 18. Ruotsalaisten kunnossapitokustannusten keskimääräinen jakautuma. Kuva on muokattu ja käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack Deliverable D1.4.6 2009).

Ruotsissa on laadittu kuvan 18 mukainen kunnossapitokustannusten jakautuma. Suurin kustannusluokka (34 %) sisältää ulkoistettujen kunnossapitosopimusten päälysrakennetöitä, joita ei ole voitu luokitella. Ulkoistetut kunnossapitotyöt sisältävät esimerkiksi kiskojen ja vaihteiden kunnossapitoa. (Innotrack Deliverable D1.4.6 2009)

Kunnossapitokustannusten erittely on haastavaa, koska tarkkojen laskemien tekemiseksi tarvitaan yksikkökustannustasoa tietoa esimerkiksi komponenttien hankintahinnoista ja työntekijöiden palkkakustannuksista. Kunnossapitokustannukset saattavat muodostaa jopa investointikustannuksia suuremman osuuden ratarakenteen elinkaarikustannuksista. Joissakin kirjallisuuslähteissä on jopa laskettu kunnossapitokustannusten muodostavan 70 % elinkaarikustannuksista. (Berggren 2009)

Suomessa kunnossapito perustuu kunnossapitäjän ja Liikenneviraston useampivuotiseen sopimukseen. Kunnossapito on avattu kilpailulle ja kunnossapitosopimuksia kilpailutetaan alueellisesti tietyllä osalla rataverkkoa. Kunnossapitosopimus tehdään useimmiten viideksi vuodeksi kerrallaan. Rataverkon kunnossapitoon liittyvät kiinteästi myös alueisännöitsijät, jotka ovat sopimussuhteessa Liikennevirastoon. Alueisännöitsijät valvovat kunnossapitotyötä. Suomen kunnossapitokustannuksista ei ole laadittu kuvan 18 mukaista jakautumaa.

Kunnossapitosopimuksessa on määritelty sopimukseen kuuluvat työt, yksikköhintaiset työt ja erikseen tilattavat työt. Sopimukseen kuuluu lisäksi turvallisuus-, korjaus-, huolto- ja kunnonvalvontatehtäviä. Erikseen tilattavat työt ja yksikköhintaiset työt voidaan myös kilpailuttaa erikseen. Kunnossapitosopimuksessa sovitaan kiinteä sopimushinta. Yksikköhintaisia töitä ovat muun muassa pölkkyjen vaihtaminen silloin, kun määrä on suuri, vaihdepölkkyjen vaihto ja vaihdealueen tukikerroksen vaihtaminen. Suurin osa kunnossapitotöistä kuuluu kuitenkin kiinteään sopimushintaan. Li-

kennevirasto maksaa sopimushinnan mukaisen korvauksen kunnossapitäjälle kuukausittain kunnossapitäjän työsuorituksen ja niistä laadittujen raporttien mukaisesti. Kunnossapitotehtävät luokitellaan Liikenneviraston kulutilien mukaisesti. Kunnossapitotöiden kustannusten pääluokat ovat pohja- ja alusrakenteet, päällysrakenteet, liikenteen ohjaus- ja turvallisuusjärjestelmät, sähköratajärjestelmät, radan vahvavirta, sillat, varusteet ja erikoisrakenteet ja raideliikenteen telemaattiset järjestelmät. Toisin sanoen Liikenneviraston kirjanpidosta voidaan tarvittaessa tuottaa tiedot kustannusten jakautumasta edellä mainittuihin kustannusluokkiin. (Liikennevirasto 2010a, Liikennevirasto 2010b)

Edellä esitetty kunnossapitokustannusten jaottelu voi olla elinkaarikustannuslaskentaa varten hieman liian suurpiirteisiä, mutta voi toimia lähtökohtana kunnossapidon kustannusten tarkemmalle jaottelulle. Erityisesti tulevaisuudessa Ratapurkki sovellutuksen (luku 5.2) ollessa tuotantokäytössä on mahdollista tuottaa ajantasaista tietoa kunnossapitotoimenpiteiden kustannusten kehittymisestä ja kunnossapidon vaikutuksesta koko rakenteen elinkaareen.

Kunnossapitokustannusten suuruutta voidaan tarkastella suhteutettuna raidekilometreihin tai liikennemäärään. Ratahallintokeskuksen hankearviointiohjeen mukaisesti kunnossapitokustannukset määräytyvät kunnossapitotason mukaan siten, että kunnossapitokustannukset ovat suurimmat vaativimmassa kunnossapitoluokassa 1 A ja pienenevät kunnossapitotason laskiessa (taulukko 8).

Taulukko 8. Ratahallintokeskuksen hankearviointiohjeen kunnossapitokustannusten taulukko (Ratahallintokeskus 2004).

Kunnossapitotaso	Radan nopeus (km/h)	Kustannus (1000 €/raide-km/vuosi)
Sähköistetty pääraide		
taso 1A	nopeus > 140	10.0
taso 1	120 < nopeus ≤ 140	9.0
taso 2	nopeus ≤ 120	8.0
taso 3	nopeus ≤ 110	6.0
Sähköistämätön pääraide (3)	nopeus ≤ 110	4.5
Pää- ja sivuraiteet ja puolenvaihtopaikat (4)	70 < nopeus ≤ 100	5.5
Pää- ja sivuraiteet (5)	50 < nopeus ≤ 70	6.0
Pää- ja sivuraiteet sekä kuorma- ja seisontaraiteet (6)	nopeus ≤ 50	4.0

Koskela on koonnut työhönsä taulukon vuosien 2006-2008 kunnossapitokustannusten toteutumasta eri kunnossapitoluokissa (taulukko 9). Kun taulukon 9 kustannukset suhteutetaan vuosittaiseen liikennemäärään, saadaan taulukon 10 mukaiset tulokset. Kun tarkastellaan eri kunnossapitotasojen liikennemäärällä painotettuja kustannuksia, havaitaan, että alimmassa kunnossapitoluokassa 6 kustannukset ovat kaikkein suurimmat, kustannukset ovat lähes kymmenkertaiset verrattuna 1A tason kustannuksiin.

Taulukko 9. Keskimääräiset kunnossapitotasojen kustannukset vuosina 2006–2008. Kustannuksien laskennassa on huomioitu rataosuuden pituus. Kustannukset ovat kunkin kunnossapitotason keskimääräiset kustannukset painotettuna rataosuuden pituudella. (Koskela 2009).

Kunnossapitotaso	1A	1	2	3	4	5	6
Kustannus €/r-km/a	16 000	10 500	8 500	9 000	9 500	9 000	3 500

Taulukko 10. Kokonaisliikennemäärän huomioiva, raidekilometreillä painotettu keskimääräinen kunnossapitokustannus eri kunnossapitotasoilla. (Koskela 2009)

Kunnossapitotaso	1A	1	2	3	4	5	6
€/r-km/Mbrt/a	1 500	1 000	2 500	5 500	8 000	9 500	13 500

Rataosakohtaisissa tarkasteluissaan Koskela (2009) on todennut kustannusten ja liikennemäärän keskinäisen riippuvuuden olevan osittain ristiriitainen ja toteaakin myös muiden syiden, kuten rataosan nykyisen kunnon tai tehtyjen kunnossapitotoimenpiteiden vaikuttavan kustannusten jakautumiseen. Kunnossapitokustannusten yksityiskohtaisempi tarkastelu ja mahdollinen optimointi sekä vaikutus elinkaarikustannuksiin edellyttää jatkossa huomattavasti yksityiskohtaisempaa kunnossapitotoimenpiteiden ja kustannusten tilastointia.

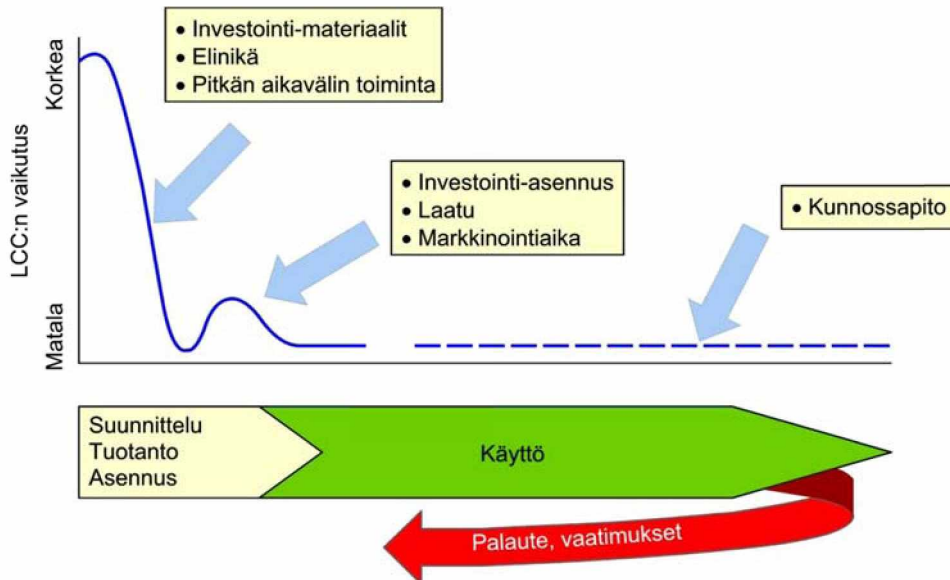
Suomessa kunnossapitokustannusten rooli kannattavuustarkastelujen laskenta-aikana on usein hyvin pieni verrattuna investointikustannuksiin. Kunnossapitokustannukset oletetaan usein myös vakiosuuruisiksi koko elinkaaren aikana. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu ratarakenteen vaurioitumisen lisäävän kunnossapitotarvetta ja -kustannuksia. Nurmikolu (2011) esittää artikkelissaan perustellusti kysymyksiä siitä, ovatko investoinnit laadultaan mahdollisesti liian hyviä ja ovatko nykyisillä kriteereillä määritellyn elinkaarensa päässä olevan radan ja uuden radan kunnossapitokustannukset yhtä suuria. Rakenteen käyttöä jatkamiseen tarvittavien kunnossapitotoimenpiteiden edullisuutta suhteessa korvausinvestointeihin ei vielä nykytiedon perusteella pystytä määrittämään. Tällaiset kannattavuustarkastelut edellyttävät nykyistä syvällisempää teknistä ymmärrystä rakenneosien vaurioitumisesta elinkaaren aikana. (Nurmikolu 2011)

3.4 Investointikustannukset

Koska ratarakenteiden käyttöikä on pitkä ja sen investointikustannukset ovat suuret, olisi investointeja tehtäessä pystyttävä selvittämään investointien pitkän aikavälin kustannusvaikutukset rakentamiseen, kunnossapitoon ja käyttöön. Kustannusvaikutusten jaottelu on haastava tehtävä ja se edellyttää tietojen keräämistä useista erilaisista lähteistä ja lopulliseen päätöksen tekoon on laskelmien lisäksi aina käytettävä myös kokemukseen perustuvaa asiantuntija-arviointia. (Esveld 2001)

Investointikustannukset muodostavat suuren osan elinkaarikustannuksista jo ennen kuin esimerkiksi kiskon tai ratapölkyn elinkaari alkaa, näin ollen suurimmat säästöt voidaan tehdä investoimalla järkevästi (kuva 19). Ratarakenteiden ja komponenttien

tekniseen suunnitteluun ja tuotantoon investoimalla voidaan saavuttaa suuria säästöjä. Investointipäätöksellä on kuitenkin myös aina merkittävä rooli elinkaaren aikana syntyvien kunnossapito- ja käyttökustannusten muodostumisessa, kun rakenteiden käyttöikä on pitkä. (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)

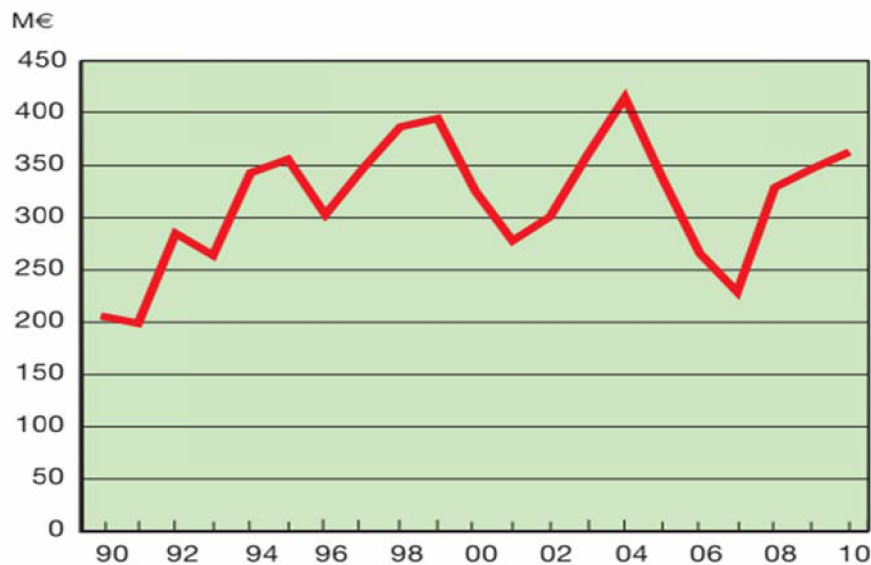


Kuva 19. Investointien, asennuksen ja kunnossapidon kustannusten vaikutus elinkaarikustannuksiin. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack Guideline D6.5.4 2006).

Investointikustannukset muodostavat merkittävän osa ratarakenteen elinkaarikustannuksista elinkaaren alkuvaiheessa (Ratahallintokeskus 2004). Investointikustannuksiin vaikuttaa ensisijaisesti radan haluttu tekninen taso, mikä samalla määrittelee myös elinkaaren aikaiset kunnossapitokustannukset. (Koskela 2009).

Erilaisten investointien kustannus- ja hyötyvaikutuksia voidaan tutkia käyttämällä hyöty/kustannusanalyysia ja analyysin avulla laskettavaa hyöty/kustannussuhdetta. Suomessa Liikenneviraston liikenneväylähankkeiden arvioinnin yleisohjeessa ja ratahankkeiden hankearvointiohjeessa on esitetty hyöty-kustannusanalyysin laskentavaiheet ja periaatteet. Suomessa hyöty-kustannussuhde lasketaan ”bruttoperiaatteella” eli nimittäjässä on vain investointikustannus ja kaikki investoinnista seuraavat hyödyt ja kustannukset ovat osoittajassa. Vuoden 2011 lopulla julkaistussa uudessa liikenneväylähankkeiden hankearvointiohjeessa hankearvioinnin piiriin on otettu aiemmasta ohjeesta poiketen myös korvausinvestoinnit. Hankearviointi laaditaan yleensä yleissuunnitelmatasolla. Hyötykustannussuhde lasketaan liiketaloudellisissa tarkasteluissa useimmiten kuitenkin siten, että hyödyt ja kustannukset jaetaan investointi- ja kunnossapitokustannusten summalla. Suomalaista laskentatavassa kunnossapitokustannus tulkitaan vaikutukseksi eikä kiinteästi investoinnin yhteydessä määritettäväksi kulueräksi. Hankkeiden kannattavuuslaskenta tehdään yhteiskuntataloudellisen hyötykustannusanalyysin periaatteita noudattaen 30 vuoden käyttöaikana. Nykyarvon laskennassa käytetään 4 % diskonttokorkoa. Hankearvioinnin yleisohjeen avulla voidaan arvioida ensisijaisesti strategisella tasolla kehittämisinvestointien kustannuksia ja kannattavuutta. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2003, Liikennevirasto 2011a)

Koko rataverkon korvausinvestointien kustannukset vaihtelevat vuosittain. Tuomisen (2004) mukaan kustannustaso olisi vuonna 2011 hieman yli 100 milj. €. Korvausinvestointien tarve ja kustannukset luonnollisesti nousevat rataverkon komponenttien ikääntymisen myötä, ellei rahoitustasoon tule muutoksia. Ratarakenteiden korvausinvestointien vuosittaisesta yksityiskohtaisesta määrästä ei ole saatavissa tarkkoja tilastotietoja. Kuvassa 19 on esitetty kaikki radan pidon investoinnit, kokonaissumma on yli 350 milj. €. Kokonaissumma sisältää myös kehittämisinvestointien kustannukset. (Liikennevirasto 2011b)



¹⁾ Kiintein vuoden 2010 hinnoin – Till fasta 2010 års priser.

Kuva 20. Radanpidon investoinnit. Kuvaaja sisältää myös kehittämisinvestoinnit. (Liikennevirasto 2011b)

3.5 Viivytyksistä ja suorituskyvystä aiheutuvat kustannukset

Viivytyksistä ja rataverkon suoritus/välityskyvystä tai oikeammin sen puutteesta aiheutuu kustannuksia sekä matkustajalle että liikennöijälle ja mahdollisesti myös rataverkon omistajalle, jos viivytyksekustannus aiheutuu esimerkiksi radassa olevasta viasta. Viivytyksistä ja suorituskyvystä syntyvät kustannukset liittyvät oleellisesti osana myös RAMS-analyysihin, joita käsitellään tarkemmin luvussa 4.

Suomessa on käytössä Nervolan (2009) tutkimukseen perustuva suorituskannustinjärjestelmä. Suorituskannustinjärjestelmä liittyy liikenteen ja ratatöiden aikataulutuksiin, koska myöhässä tai etuajassa oleva liikenne aiheuttaa muulle liikenteelle häiriötä samalla tavalla kuin esimerkiksi ratatyön työraon ylitys tai ratalaitteen vika. Järjestelmässä on määritelty radan käytettävyyden poikkeamista aiheutuvat sanktiot sekä rataverkon haltijalle että rautatieyritykselle. Periaatteena on, että radan laitteiden tai esimerkiksi ratatyön työraon ylityksen aiheuttamista viivytyksestä aiheutuva kustannuksesta vastaa rataverkon haltija, kun taas esimerkiksi kalustovian aiheuttavasta viivytyksestä vastaa liikennöijä.

Maksut määrätään rataverkon käyttösopimuksessa vuosittain. Esimerkiksi vuoden 2010 käyttösopimuksen mukaan sanktioita maksetaan aina kun myöhästyminen on 15 minuuttia henkilökaukoliikenteen tai lähiliikenteen junalla ja 30 minuuttia tavaraliikenteen junalla. Sanktioita maksetaan myös, jos juna perutaan äkillisesti. Vuonna 2010 esimerkiksi peruttu henkilökaukoliikenteen juna aiheutti 1920 € sanktion. Myöhästyneen henkilökaukoliikenteen junan sanktio on 32 €/myöhästymisminuutti, maksimissaan maksu peritään 120 minuutilta yksittäistä myöhästymistä kohti. Liikennöijä ja rataverkon haltija sopivat korvauksista keskenään tietyin aikavälein. (Ratahallintokeskus 2009)

Ruotsalaisten selvitysten mukaan tavaraliikenteen myöhästymiskustannukset on luokiteltu kuljetettavan tavarahan mukaan siten, että valmistuotteiden kuljettamisesta aiheutuva myöhästymiskustannus on suurin 1,12 €/tunti/tonni. Rautamalmin ja tukkipuun myöhästymiskustannus on vastaavasti pienin vain 0,01 €/tunti/tonni. Käytännössä mitä jalostetumpi tuote sitä suurempi on myöhästymiskustannus. (Nervola 2009)

Myöhästymiskustannuksia voidaan luokitella myös junatyypeittäin siten, että suurnopeusjunien myöhästymisminuutti on kallein 19,40 € ja vastaavasti nopean tavarajunan kustannus 3,29 €/minuutti. Intercity-junan ja lähijunan myöhästymisminuuttien hinnat ovat vastaavasti 8,20 ja 7,80 €/minuutti. (Nervola 2009)

Esimerkiksi hyötykustannusanalyysissä voidaan tarkastella matka-ajan säästön tuottamia hyötyjä. Matka-aika säästön arvo kuvaa matkojen ajallisen lyhentymisen käyttäjälle tuottamaa hyötyä. Joukkoliikenteen matka-aikojen arvot voidaan jakaa kolmeen luokkaan matkan tyypin mukaan: Työajan matka-aikasäästön arvo on selvästi suurin 25,59 €/tunti, kun vastaavasti vapaa-ajan, loman tai asioinnin matka-aikasäästön arvo on 7,22 €/tunti. Matka-ajan arvo matkustajalle on keskimäärin 10 euroa/tunti. Epätasällisuuden aiheuttamien kustannusten mittaaminen on kuitenkin hankalaa, koska todelliset myöhästymisen aiheuttamat kustannukset ovat aina tapauskohtaisia. (Nervola 2009)

Suomessa routimisen ja talviolosuhteiden aiheuttamat viivytykset ovat kahden viime talven aikana suuria. Täsmällisyydelle on asetettu tietyt tavoitteet (90 % junista saapuu enintään 5 min myöhästyneenä pääteasemalle) ja esimerkiksi talvella 2009–2010 henkilökaukoliikenne oli tavoitteiden mukaista vain 14 päivänä. Routavauriot keskittyvät kevätkuukausiin ja jatkuvat pahimmassa tapauksessa kesäkuuhun saakka. Talven 2010–2011 aikana routavaurioiden aiheuttamat viivästykset olivat hieman pienempiä, koska pahimman routakauden ajaksi otettiin käyttöön niin kutsutut routa-aikataulut. (Liikennevirasto 2010c)

4 Elinkaarikustannusten ja kunnan kehittymisen arvioinnissa käytettyjä menetelmiä

4.1 Yleistä

Elinkaariarvioinnista ja -kustannuslaskennan käytöstä on tehty tutkimusta aktiivisesti viimeisen parinkymmenen vuoden aikana erilaisissa yhteiseurooppalaisissa tutkimushankkeissa ja yksittäisissä maissa eri rautatiealan toimijoiden toteuttamana. Tutkimusten tuloksena on saatu aikaan perusteiltaan erilaisia malleja ja niiden perusteella kehitettyjä ohjelmistoja. Osaa ohjelmistoista on kehitetty edelleen ja sovellettu myös käytännön toimintaan. Valitettavasti osa tutkimustyön tuloksista on kuitenkin jäänyt käyttämättömäksi joko taloudellisten syiden tai esimerkiksi tiedon keräämisen hankaluuden ja järjestelmien yhteensopimattomuuden vuoksi. Kehitetyt mallit ovat perusteiltaan erilaisia ja ne voidaan karkeasti jaotella mekanistisiin ja tilastollisiin/ekonomistisiin malleihin. Oleellisena osana kaikissa malleissa on radan kunnan kehittymisen mallintaminen ja sitä kautta muodostuvien kunnossapitokustannusten ja korvausinvestointien optimointi.

Mekanistiset mallit perustuvat yleensä ratarakenteista mitattuun tietoon ja mekaanisen käyttäytymisen mallintamiseen. Mekanistiset mallit ovat yleensä tarkempia kuin tilastolliset mallit, erityisesti silloin, kun tarkastellaan jonkun komponentin fysikaalisia muutoksia. Mekanististen mallien kehittäminen on kallista ja ne vaativat syvällistä rataympäristön komponenttien ja vuorovaikutussuhteiden ymmärtämistä. Toki myös mekanististen mallien kehittämisessä joudutaan tekemään joitakin oletuksia ja käyttämään tilastollisia menetelmiä.

Tilastollisten ja ekonomististen mallien avulla ennustetaan kunnan kehittymistä perustuen historialliseen tietoon ja/tai nykytilasta kerättyyn tietoon. Tilastolliset mallit soveltuvat tapauksiin, joissa rakenneosan käyttäytymisessä ei tapahdu sellaisia äkillisiä muutoksia, jotka vaikuttavat mekaanisiin ominaisuuksiin tai muuttavat kunnan kehittymisen trendiä.

Koska mekanistiset mallit muodostuvat helposti monimutkaisiksi ja toisaalta tilastolliset/ekonomistiset mallit taasen ovat liikaa yksinkertaistavia, paras ratkaisu lienee usein näiden kahden lähestymistavan yhdistelmä. Tärkeätä on käyttää tilastollisten mallien pohjana insinööritieteisiin perustuvia valintoja. Esimerkiksi joidenkin tutkimusten mukaan pölkkyjen vaurioitumismalliin tulisi ottaa mukaan vain todennäköisimmät vaurioihin vaikuttavat tekijät eli akselikuorma, jousittamaton massa ja nopeus (Schmid et al. 2010).

Ratarakenteiden hallintaan, kunnossapitoon ja liikennöintiin kuuluvat oleellisena osana myös eri toimijoiden toiminnan hallinta- ja ohjausjärjestelmät. Toiminnan ohjausjärjestelmistä on tehty paljon tutkimusta ja järjestelmät kehittyvät jatkuvasti. Sen vuoksi tähän yhteyteen ei ole kerätty yksityiskohtaisia tietoja laajemmista järjestelmistä, vaan on haluttu keskittyä ensisijaisesti ratarakenteen elinkaariarvioinneissa käytettyihin malleihin ja ohjelmistoihin.

Tässä luvussa esitellään lyhyesti edellä mainittuun jaottelun mukaisesti elinkaariarviointiin liittyviä malleja ja tehtyjä tutkimuksia. Lisäksi lukuun on koottu tietoja muutamista eurooppalaisista yhteisprojekteista. Mallien ja ohjelmistojen sisältöä ei käydä yksityiskohtaisesti läpi, vaan esitellään niiden peruseriaatteet. Jaottelu mekanistiin ja ekonomistisiin malleihin on jossakin määrin keinotekoinen ja useissa malleissa on piirteitä sekä mekanistisesta että ekonomistisesta lähestymistavasta. Elinkaari-mallit liittyvät kiinteästi kunnossapito- tai investointikustannusten optimointiin ja ne edellyttävät radan eri komponenttien kunnon kehittymisen tuntemista. Tarkemmin joitakin yksittäisiin rakenneosiin liittyviä malleja on esitelty luvussa 6. Liitteeseen 1 on koottu taulukko elinkaari-, kunnossapito- ja tiedonhallintamallien ja -ohjelmistojen pääsisällöstä ja referensseistä.

4.2 Eurooppalaiset yhteisprojektit

Euroopassa on toteutettu useita elinkaariarviointiin ja -kustannuslaskentaan liittyviä yhteishankkeita Euroopan komission puiteohjelmien tai UIC:n rahoituksella. Taulukoon 11 on koottu lyhyt yhteenveto muutamista hankkeista ja hankkeiden pääsisällöistä. Myös tällä hetkellä on meneillään muutamia rataympäristöön liittyviä EU:n seitsemannen puiteohjelman hankkeita. Myös tulevaisuudessa tullaan toteuttamaan eurooppalaisia yhteishankkeita. Ruotsalaiset ja norjalaiset ovat olleet aktiivisesti mukana näissä hankkeissa. Tulevaisuudessa myös suomalaisten olisi aktiivisemmin pyrittävä hankkeisiin mukaan.

Ecotrack-hanke toteutettiin 1990-luvulla ja sen lopputuote valmistui vuonna 1998. Ohjelmisto on kehitetty Euroopan rautatietutkimukseen keskittyvässä tutkimuskeskuksessa (ERRI). Tällä hetkellä *Ecotrack*-ohjelmistoa myy Arcadis niminen yritys. *Ecotrack* on periaatteessa kunnossapito- ja uusimistoimenpiteiden päätöksentekoa kokonaisvaltaisesti tukeva järjestelmä. Järjestelmä koostuu koko hallittavan rataverkon yksityiskohtaisista tiedoista. Rataverkko on jaettu 200-500 metriä pitkiin osiin, joille on jokaiselle oma kunnon kehittymistä kuvaava funktio. Koska kysymyksessä on kaupallinen ohjelmisto, sen sisältämiin funktioihin on hankalaa päästä käsiksi.

Innotrack-projekti toteutettiin 2006-2009. Projektin tavoitteena oli kehittää entistä kustannustehokkaampaa rataympäristöä etsimällä innovatiivisia ratkaisuja investointi- ja kunnossapitokustannusten pienentämiseksi. Projektin tavoitteena oli myös luoda yleinen elinkaarikustannuslaskentajärjestelmä, joka hyödyntää myös RAMS-menettelyä. Projektin johtopäätöksissä on esitetty muun muassa, että elinkaarikustannuslaskenta, joka huomio koko rataympäristön ja sen sisäiset vuorovaikutussuhteet, on erittäin vaikeaa. Lopputuloksissa todetaan kuitenkin, että hanke- tai investointikohtainen tarkastelu on perusteltua tehdä elinkaarikustannusten avulla. Yksittäiset elinkaari-taloudellisuustarkastelut hyödyttävät pitkällä tähtäimellä koko rataympäristöä. Yleensä elinkaarikustannuslaskennalla saavutettavat hyödyt tulevat esiin vasta useamman vuoden käytön ja kokemusten jälkeen. Myös rakenteiden ja syntyvien kustannusten järjestelmällinen monitorointi rakentamisen jälkeen on suositeltavaa, jolloin taloudelliset vaikutukset voidaan todentaa paremmin. *Innotrack*-projektin tulosten mukaan rataympäristön kustannusten jaottelun vaihtelevuus vaikeuttaa kustannusten arviointia ja näin ollen heikentää esimerkiksi uusien innovaatioiden todellisen hyödyn laskemista. Osa *Innotrack*-projektin tuloksista on julkaistu vain projektin sisäiseen käyttöön ja ne todennäköisesti sisältävät yksityiskohtaisempaa tietoa esimerkiksi eri toimijoiden järjestelmistä. (*Innotrack Deliverable D1.4.8* 2009)

EUROBALT-projekteja on toteutettu kaksi kappaletta 1990-luvulla. Eurobalt II -projektissa on kehitetty mekanistinen todennäköisyysmalli raiteen geometrian kehittymiselle. Mallin kehittäminen tehtiin yhteistyössä eri Euroopan maiden rautatieviranomaisten, yritysten ja yliopistojen kanssa. Projektin lopputuloksena todettiin, että seuraavat tekijät ovat kaikkein tärkeimpiä laskettaessa raidegeometrian säilyttämisen elinkaarikustannuksia:

- Kiskon epätasaisuus lyhyillä aallonpituuksilla
- Epätasaisuus pitkillä aallonpituuksilla
- Kiskojohtokosten hitsien aiheuttama radan epätasaisuus
- Kiskojohtokosten aiheuttama epätasaisuus
- Pyörien epätasaisuus (ero ympyrästä)
- Akseli- ja pyöräkuormat
- Jousittamaton massa
- Jousituksen parametrit
- Junan nopeus
- Rataosan ominaisuudet
- Aluslevyjen jäykkyys
- Pohjamaan jäykkyys
- Ratapenkereen epätasaisuus
- Sepelikerroksen paksuuden vaihtelu
- Pölkkyväli

Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa sepelityyppi ja sen kunto ja kunnossapidon tehokkuus. Projektin tuloksena saatiin muun muassa yhteys radan jäykkyyden ja radan geometrian välille. (Schmid et al. 2010)

Taulukko 11. Yhteenveto muutamista toteutetuista eurooppalaisista elinkaarikustannuslaskentaan liittyvistä selvityksistä ja tutkimushankkeista.

Nimi ja toteutusvuosi	Toteuttaja(t)/Kehittäjät	Pääsisältö	Viitteet
Eurobalt I ja II (European research project for Optimised BALLasted Track)	EU komission Brite-Euram II ohjelman projekti (1992-1994) ja Brite Euram III projekti (1997-2000)	Mekanistinen todennäköisyysmalli radan geometrian kehittymiselle.	Eurobalt I http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/26840561EN6.pdf Eurobalt II (Meissonnier 2000)
Ecotrack (ECONOMICAL TRACK)	UIC:n ja European Rail Research Institute:n (ERRI) ja 24 muun rautatiealan toimijan yhteisprojekti 1994-1998	Uusimisen ja kunnossapidon päätöksentekojärjestelmä, valmistunut vuonna 1998 ja kehitystyötä jatkettu. Tällä hetkellä Ecotrack järjestelmää myy Arcadis Ltd. Edellyttää rataverkon jaottelua lyhyisiin osuuksiin (200-500 m). Jokaiselle rataosuudelle voidaan luoda kunnan kehittymisen, kunnossapidon ja kustannusten malli.	Muun muassa (Rivier 1998) (Jovanovic 2003, Jovanovic 2001, Jovanovic, Zaalberg 2000)
ProM@in (Progress in Maintenance and Management of Infrastructure)	EU komission ja DG:n (Saksa) rahoituksella vuosina 2000-2004 toteutettu verkostohanke	Yhteenvetoja Euroopassa rataympäristössä käytössä olevista LCC työkaluista ja niiden tulevaisuuden kehityksestä.	Julkaisut ladattavissa osoitteesta http://www.promain.org/

Innotrack (INNOvative TRACK Systems)	EU:n kuudennen puiteohjelman projekti (2006-2009)	Elinkaarikustannustaskennan ja RAMS menettelyn yhdistäminen. Kattava kooste menettelytavoista ja menetelmistä. Osaprojekteissa on tehty esimerkkilaskelmia eri menetelmillä.	Julkiset raportit löytyvät osoitteesta http://www.innotrack.eu/
Catrin (Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost)	EU:n kuudennen puiteohjelman projekti (sisältää myös tie-, vesi ja ilmailukenteen) 2005-2009	Ratamaksujen perusteena olevien rajakustannusten laskentamenettelyt eri maissa. Suosituksia kustannusfunktioista ja joustokertoimista.	Julkiset raportit ladattavissa osoitteesta http://www.catrin-eu.org/
SUPERTRACK (Sustained Performance of Railway Tracks)	EU:n viidennen puiteohjelman projekti 2002-2005	Rakenteiden erityisesti ratapenkereen ja sepelein käyttäytymisen ensisijaisesti nopean liikenteen radoilla.	Raportit saatavissa osoitteesta http://www.supertack.no/
UIC Under sleeper pads	UIC:n työryhmä 2009	Ratapölkkyjen pohjainten lyhyen ja pitkän aikavälin vaikutusten ja elinkaarikustannusten kartointus.	(UIC 2009)
UIC Maintenance/Renewal Optimisation	UIC:n työryhmä 2007	Kunnossapidon ja korvausinvestointien optimoinnin tilannekatsaus ja tulevaisuuden näkökulmien hahmottelu.	(UIC 2007)
UIC Track Condition monitoring	UIC:n työryhmä 2010	Radan kunnan monitoroinnin yhteenvetoraportti ja kunnan monitoroinnin merkitys toimintajärjestelmissä.	(UIC 2010)

CATRIN-tutkimusprojektissa keskityttiin ensisijaisesti eri liikennemuotojen rajakustannusten määrittelyyn. Projektin aikana käytiin läpi eri maissa olevia rajakustannusten laskentaan käytettyjä tuloksia ja arvioitiin erilaisten kustannusfunktioiden soveltuvuutta laskentaan. CATRIN-projektin tulosten perusteella esitettiin suosituksia rajakustannusten, kustannusfunktioiden ja joustokertoimien määrittelyyn. Projektin tuloksia on käsitelty tarkemmin luvussa 3.

Eurooppalaisten tutkimusprojektien lopputulokset ovat yleensä vain suosituksia. Ohjelmistokehityksen yksityiskohdat jäävät yleensä projektien osallistujien käyttöön, poikkeuksena luonnollisesti ne hankkeet joiden lopputuotteena on syntynyt kaupalliseen levitykseen siirtyneitä ohjelmistoja. Eräänä merkittävänä haasteena lähes kaikissa hankkeissa on ollut rataympäristöstä kerättävän kunto- ja kustannustiedon jaottelu riittävällä tarkkuudella.

4.3 Mekanistiset mallit

Mekanistiseksi malliksi voi kutsua sellaista ohjelmistoa, mallinnustyökalua tai järjestelmää, jonka kehittämisessä on käytetty todellisissa olosuhteissa mitattua tietoa esimerkiksi koko ratarakenteen tai sen osan mekaanisesta käyttäytymisestä. Mekanistiset mallit perustuvat mittausten lisäksi mekaanisen käyttäytymisen mallintamiseen tunnettujen fysiikan lakien mukaan ja erilaisten tilastollisten ja matemaattisten laskentamenetelmien käyttöön. Mekanistisia malleja voidaan kehittää yksittäiselle ratarakenteen osalle tai koko rakenteelle, pisimmälle viedyt mallit koostuvat radan mallin lisäksi liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutusta kuvaavista malleista. Mallien avulla voidaan ennustaa radan käyttäytymistä ja kunnan kehittymistä, minkä jäl-

keen malliin voidaan liittää kustannustekijät ja tehdä elinkaaritaloudellisuustarkasteluja.

4.3.1 USA

USA:ssa on useita rataverkon omistajia ja liikennöijä ja suuri osa liikenteestä on tavaraliikennettä. Rautatiejärjestelmän rakenne on väistämättä johtanut melkoiseen joukkoon sääntöjä ja sakkopykälä, joilla voidaan esimerkiksi hallita kaluston kunnan haitallisia vaikutuksia ratarakenteelle tai päinvastoin. Elinkaarikustannusten arviointijärjestelmää ei ole, mutta Haapalahti et. al. (2010) mukaan järjestelmä on kehitteillä. Elinkaaritaloudellisuuden arviointia on kehitetty kuitenkin erilaisissa suoraan rataverkolle kohdennetuissa hankkeissa tai kokeellisissa olosuhteissa esimerkiksi koeraodoilla. Myös rataverkon kunnossapitoon liittyviä selvityksiä on tehty useita. Useimmat mallit ja sovellukset on kehitetty ratkaisuna johonkin tarkemmin määriteltyn ratasaan tai investointivaihtojen arviointiin. Lähtökohta on ollut useimmiten mekanistinen. Myös kaupallisia kunnossapidon tai toimintajärjestelmiin liittyvien ohjelmistojen tarjoajia löytyy useampia.

Kunnossapitokustannusten optimointi on eräs tärkeä tutkimusalue. Esimerkiksi seka liikenteen kunnossapitokustannuksien arviointiin on kehitetty malli, joka on kalibroitu todellisilla kustannuksilla. Mallin kehitystyössä on käytetty kolmea eri skenaariota, jossa tavaraliikenteen ja matkustajaliikenteen määriä on vaihdeltu prosentuaalisesti. Mallia kehitettäessä on luotu kaksi kunnossapitokustannusten mallia: (I) rataosittain laskettavat kunnossapidon työmäärät ja kustannukset sekä (II) radan komponenttien standardi käyttöiän perusteella laskettavat kustannukset. Mallin avulla on laskettu kustannuksia ja luotu kustannusmatriiseja kunnossapidon suunnittelua varten erilaisilla ratatyypeillä ja erilaisilla kuormituksilla. (Zarembski, Patel 2010)

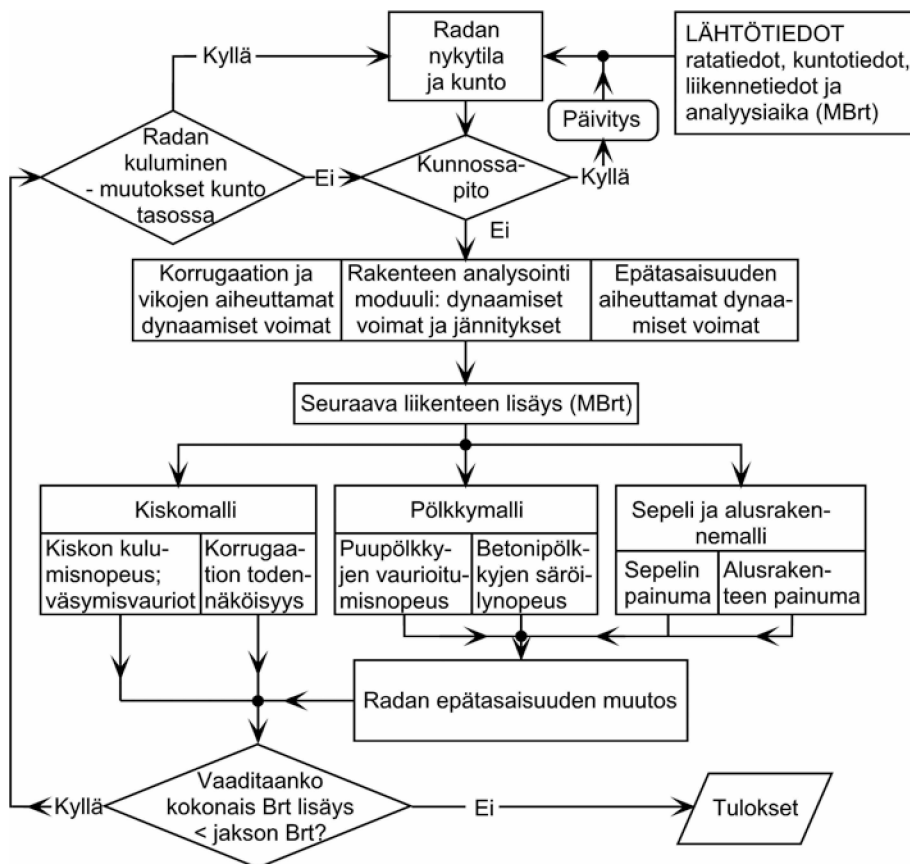
Kaluston ja kiskon vuorovaikutus on ollut merkittävä tutkimusalue TTCI:ssä (Transportation Technology Center), jossa on kehitetty kaluston dynaamista käyttäytymistä mallintava NUCARS-simulointiohjelma. Tutkimusten tuloksia on raportoitu useissa artikkeleissa. Jokaista tapausta varten räätälöidyissä elinkaarikustannusten laskentamalleissa on etuna se, että tekninen kuntotieto on tarkemmin hallittavissa. Laskentaa varten joudutaan usein tekemään muutamia oletuksia esimerkiksi paikallisista kunnossapitokustannuksista, joten mallia on hankala soveltaa toisenlaisiin olosuhteisiin. NUCARS ohjelmaan on integroitu muun muassa kiskon kulumista ennustava malli (Shu et al. 2010).

Zeta-tech Ltd on kehittänyt ja räätälöinyt erilaisia ohjelmistoja lähes kaikille ratarakenteen komponenteille. Liitteessä 1 on esitetty muutamia esimerkkejä ohjelmistoista. Kehitystyön tuloksista on julkaista useita konferenssiartikkeleita.

TRACS on USA:ssa MIT:ssa (Massachusetts Institute of Technology) kehitetty malli, jossa on yhdistetty kunnan kehittymisen mallit elinkaarikustannuslaskentaan. Mallin avulla voidaan laskea kunnossapito ja investointikustannukset ratageometrian, radan komponenttien, radan kunnan ja liikenteen koostumuksen perusteella. Kunnan kehittymisen mallit perustuvat kontrolloiduissa olosuhteissa tehtyihin tutkimuksiin TTCI:ssä ja AAR:ssä (The Association of American Railroads) sekä käytännöstä saatuihin tuloksiin. (Martland, Hargrove & Auzmendi 1994)

4.3.2 Australia

Australiassa on tehty pitkäjänteisesti työtä mekanistisen mallin kehittämiseksi lähinnä raskaan tavaraliikenteen radoille. Queenslandin teknillisessä yliopistossa on kehitetty malli, josta käytetään lyhennettä ITDM (Integrated Track Decradation Model). Malli perustuu 1980- ja 1990-luvuilla tehtyihin mittauksiin ja tutkimuksiin. Mallin periaate on esitetty kuvassa 21. Malli perustuu radan eri komponenttien mekanistisiin suhteisiin ja koostuu eri rakennneosia kuvaavista moduuleista. Mallissa eri komponenttien väliset vuorovaikutussuhteet otetaan huomioon muun muassa siten, että yhdessä komponentissa tapahtuva vaurioituminen muuttaa esimerkiksi kiskoon kohdistuvia dynaamisia voimia. (Zhang, Murray & Ferreira 2000)



Kuva 21. ITDM mallin periaatteellinen kuvaus. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Zhang, Murray & Ferreira 2000).

ITDM-malli sisältää on kolme alamallia:

- *Sepelin ja alusrakenteen malli*, jonka lähtökohtana radan painuminen ja parametrina epätasaisuus eli radan poikkeama suorasta referenssilinjasta

$$\sigma_{vo} = \sigma_{(vo)min} + 0,15 * S_L \quad (1)$$

σ_{vo} Epätasaisuuden keskihajonta (mm)

$\sigma_{(vo)min}$ Radan keskilinjän keskihajonta juuri tukikerroksen korjaamisen tai asennuksen jälkeen

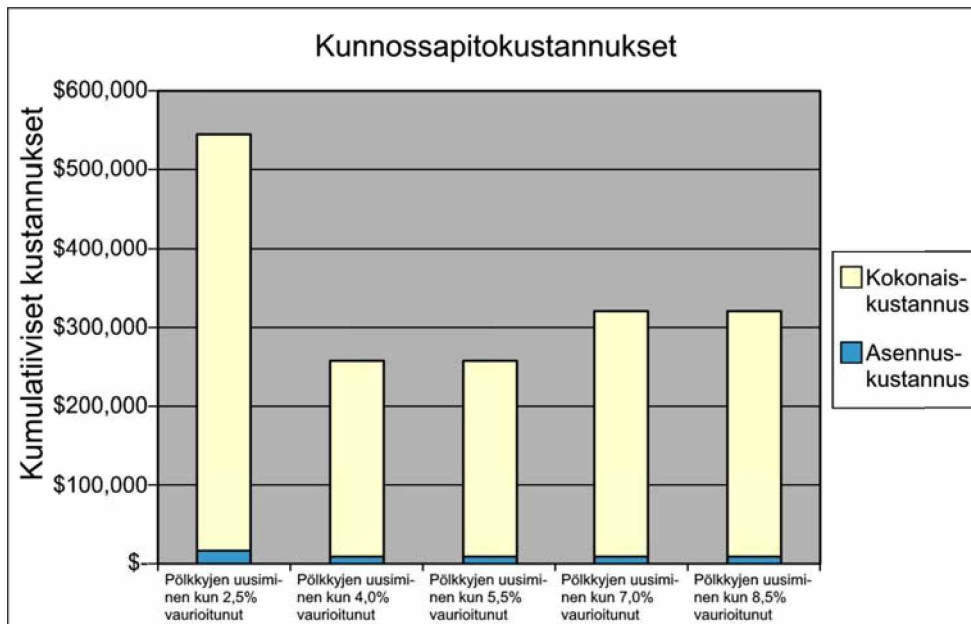
- SL Radan keskimääräinen painuma, joka on peräisin kaikista rakennekerroksista: Suure lasketaan plastisten rakennekerrosten muodonmuutosten avulla. Plastinen muodonmuutos on funktio kuormituskerroista, pyöräkuormista, sepelin laadusta ja radan moduulista
- *Kiskon kulumisen* mallissa otetaan huomioon vain kiskon kulumisen, koska oletetaan, että hionta poistaa väsymisen aiheuttamat vauriot.
 - Puupölkkyille kehitetty *ratapölkkyjen malli* perustuu ylittävien akselien määrään ajan funktiona toisin sanoen jokainen pyöräkerran ylitys aiheuttaa yhtä suuren vaurion pölkkyyn.

ITDM-mallissa on kunnan kehittymiselle kolme pääparametria:

- *Radan epätasaisuus* kuvaa ratarakenteen epätasaista painumista liikenteen vaikutuksesta
- *Kiskon kulumisen* kuvaa liikenteen ja kiskon hionnan aiheuttamaa kulumista
- *Vaurioituneiden ratapölkkyjen* prosentuaalinen osuus.

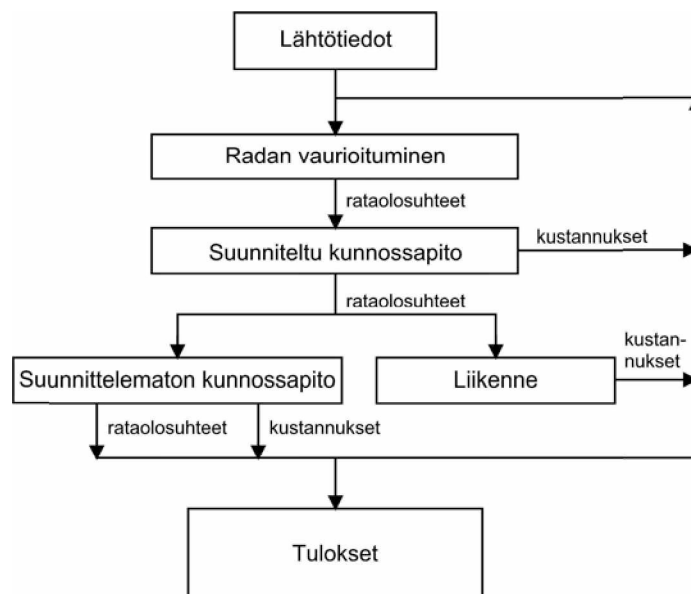
ITDM-malliin syötetään rataosittain seuraavat tiedot: radan suunnittelutiedot (kiskojen, pölkkyjen ja sepelin tiedot sekä radan geometria) vuosittaiset liikennemäärät, akselipainot, nopeudet ja pohjamaan tiedot, kuivatusolosuhteet, lämpötilan vaihtelut ja keskimääräinen sademäärä. Myös junaliikenteen viivytyskustannukset voidaan ottaa laskelmissa huomioon. Kuvassa 22 on esitetty esimerkki ITDM-mallilla tuotetusta laskelmasta, jossa pölkkyjen vaihtoa on optimoitu vaurioituneiden pölkkyjen määrän prosentuaalisen osuuteen perustuen. (Zhang, Murray & Ferreira 2000)

ITDM-mallin kehittäjien mukaan akselipaino ja liikennöintinopeus ovat kiskon kulumisen kannalta tärkeimmät muuttujat. Ratapenkereen jäykkyys sekä tukikerroksen paksuus on tärkeimmät radan epätasaisuuteen vaikuttavat tekijät. Puupölkkyjen vaurioitumiseen vaikuttavat sekä liikenteestä aiheutuvat kuormitukset että ympäristötekijät, kuten kuivatusolosuhteet ja lahoaminen. Maapohjan jäykkyyden mittauksessa tapahtuvat virheet voivat kuitenkin aiheuttaa huomattavaa vaihtelua ennakoituun epätasaisuuteen. Akselipainon nosto ei välttämättä lisää pölkkyjen vaurioita, koska akselipainon kasvaessa tulee vähemmän yksittäisiä pyöräkertojen ylityksiä. Betonipölkkyjen oletetaan kestävän paremmin, mutta radan geometria täytyy pitää kunnossa säännöllisellä tukemisella. (Zhang, Murray & Ferreira 2000)



Kuva 22. Ratapölkkyjen vaihdon optimointia vaurioituneiden pölkkyjen prosentuaalisen osuuden suhteen. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta. (Simson, Ferreira & Murray 2000).

Radan komponenttien kunnan kehittymisen lisäksi ITDM-mallin avulla voidaan optimoida kunnossapitoa (kuva 23). Kunnossapito jaetaan ennakoituun ja ennakoimattomaan kunnossapitoon. Kunnossapidon optimoinnin malli on TPM (Track Maintenance Planning Model). Mallin avulla voidaan huomioida myös radassa, kuormituksissa tai liikenteessä tapahtuvat muutokset kunnossapidon suunnittelussa. Radan kuntoa voidaan suhteuttaa esimerkiksi liikenteen sujuvuuteen eli junien myöhästymisminuutteihin tai veturien polttoaineen kulutukseen. (Simson, Ferreira & Murray 2000)



Kuva 23. Kunnossapidon optimointiin kehitetyn TPM-mallin periaate. Radan vaurioituminen mallinnetaan ITDM-mallin avulla. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Simson, Ferreira, Murray 2000).

ITDM-malli ei ole tällä hetkellä käytössä, mutta se on hyvä esimerkki mekanistisesta mallista, joka hyödyntää rataverkolta mitattua tietoa. ITDM-mallia on myös hyödynnetty esimerkiksi Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa (Larsson 2004).

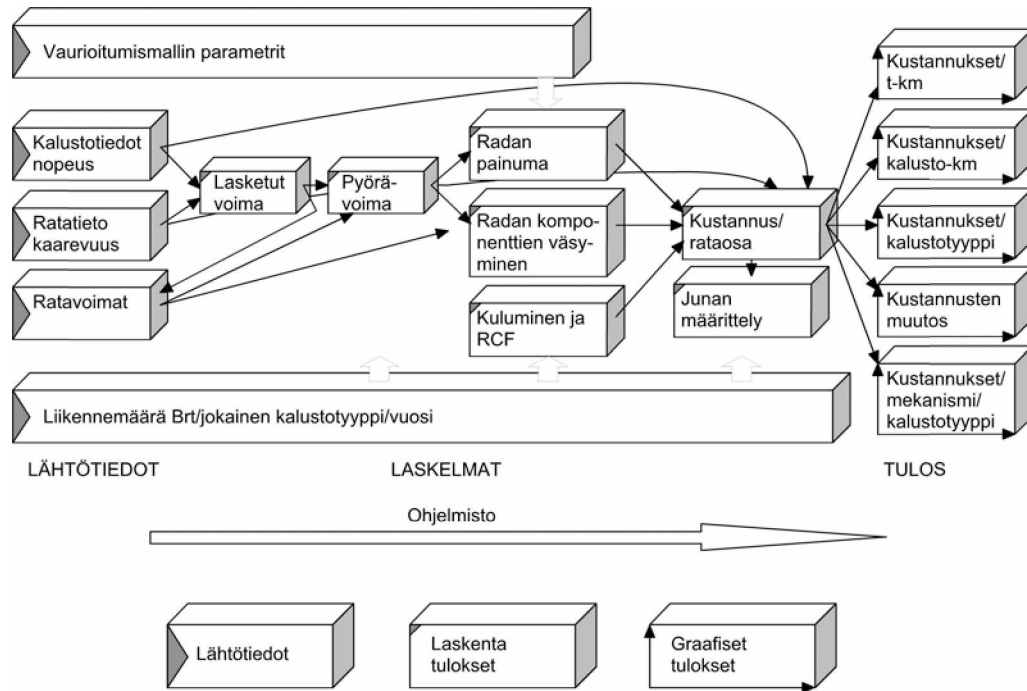
DTrack-mallin perusteet on kehitetty 1990-luvun alkupuolella, mutta sitä on kehitetty eteenpäin Queenslandin teknillisessä yliopistossa Australiassa (Leong 2007, Steffens 2005). Tällä hetkellä ohjelmisto on saatavilla kaupalliselta toimijalta Rail Innovation Australia Ltd. Mallin avulla voidaan tutkia radan dynaamisia kuormituksia ja pyöräkisko vuorovaikutuksia. Mallia on myös verrattu muihin kaupallisiin vastaaviin ohjelmistoihin ja saatu yhteensopivia tuloksia. Mallin perustana on radalta saatu pyörävoimailmaisimista saatu mittaustieto, jota käsitellään tilastollisilla menetelmillä. Todennäköisyyslaskennalla on osoitettu, että perinteinen vain staattiseen akselikuormaan perustuva pölkkyjen mitoitusmenetelmä ei ole riittävä. Junan nopeudella on myös todettu olevan suuri merkitys lovipyörien aiheuttamien voimien suuruuteen. (Leong, Murray 2008)

4.3.3 Ruotsi

Ruotsalaiset ovat olleet aktiivisesti mukana yhteiseurooppalaisissa tutkimushankkeissa, lisäksi Ruotsissa on kehitetty useampiakin malleja radan kunnan kehittymisen mallintamiseen ja elinkaaritaloudellisuuden arviointiin sekä mekanistisista että ekonomistisista lähtökodista.

Banverketin ja Kunliga Tekniska Högskolanin (KTH) yhteistyön tuloksena on valmistunut vuonna 2008 päällysrakenteen kulumiskustannusten arvioimiseksi Excel-pohjainen malli DeCAyS (Deterioration Cost Associated with the Railway Superstructure). Kehitetty malli koostuu neljästä osatekijästä: (I) radan painuminen, (II) radan eri komponenttien väsyminen, (III) kiskon kuluminen ja (IV) kiskon vierintäväsyminen (RCF). Kaikkien edellä mainittujen ominaisuuksien sisällyttäminen yhteen malliin on haastava tehtävä, mistä johtuen tehdään jonkin verran oletuksia. DeCayS-mallissa päähuomio on kiinnitetty kiskoihin ja kisko-kalusto vuorovaikutukseen. Mallin tarkoituksena on toimia myös rajakustannusten laskentamenettelyn peruslähtökohtana. Malli perustuu neljällä erityyppisellä vaunulla tehtyihin mittauksiin. Radan geometrian muutokset huomioidaan nopeudesta riippuvalla komponentilla. (Öberg, Andersson 2009) (Andersson 2002)

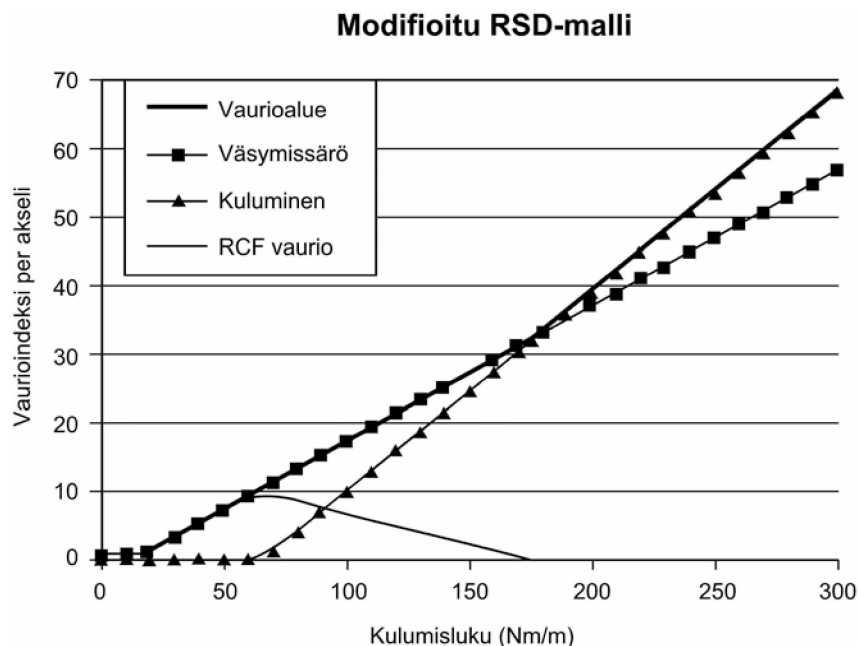
DeCAyS -mallin (kuva 24) lähtötiedoksi tarvitaan pyörä-kisko kontaktissa vaikuttavat vaaka- ja pystyvoimat sekä kitkan energiajakautuma, niin kutsuttu kulumisluku. Kulluvat voimat sisältävät staattisia, dynaamisia ja kvasistaattisia osia. (Öberg, Andersson & Gunnarson 2007)



Kuva 24. DeCayS-mallin periaatekuva. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Öberg, Andersson & Gunnarson 2007).

Öbergin ja Andersonin kehittämässä mallissa käytetään pystysuuntaista pyöräkuormaa akselipainon sijaan, mikä mahdollistaa ensisijaisesti kaarteissa esiintyvän kvasi-staattisen voimajakautuman käytön. Mallissa huomioidaan myös nopeus ja korkeataajuinen (90-100 Hz) osa dynaamisesta pyöräkuormasta. Mallin pohjana on käytetty UIC:n ORE-mallia, joka perustuu 1980-luvulla Euroopassa tehtyyn testaukseen ja kokemukseen. Kiskojen vierintäväsymiseen ja kulumiseen sovelletaan RSD-mallia, jonka on kehittänyt DeltaRail Group Ltd. Mallin lähtötietona käytetään kulumislukua (Nm/m), joka lasketaan kokonaisosittaisluistovoiman ja luisuman tulona ($F \cdot v$). Kulumisluvusta käytetään myös termiä T-gamma, joka on approksimoitu jännitysenergiajakautuma pyörä-kisko kontaktissa. Pyörä-kisko kontaktin teoriaa on käsitelty tarkemmin julkaisussa Hakulinen et al. (2011).

RSD-mallissa huomioidaan vierintäväsymisen ja kulumisen välinen suhde, koska kaarteissa kulumisen on hallitsevampi prosessi ja se poistaa vierintäväsymisen aiheuttamia vaurioita. RSD-mallia on ehdotettu muokattavaksi siten, että se jaetaan kahteen osaan, joista toisessa vierintäväsyminen on dominoiva prosessi ja toisessa osassa kiskon kulumisen on dominoiva. Kuvassa 25 on esitetty muokatun RSD-mallin mukainen kulumisluvun ja akselia kohden lasketun kulumisindeksin välinen yhteys. DeCayS -mallin avulla voidaan siis laskea vuosittainen keskimääräinen kulumisen rajakustannus riippuen radan kaarteisuudesta ja käytetystä kalustosta. (Öberg, Andersson 2009) (Andersson 2002)



Kuva 25. *Modifioitu RSD-malli. Kun kulumisluku on 0-15, ei tapahdu kulumista eikä vierintäväsymistä. Kun kulumisluku on 15-65, vierintäväsyminen voidaan havaita ja se hoidetaan kiskohionnalla. Varsinaista kulumista tapahtuu, kun kulumisluku on > 175. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Öberg, Andersson 2009).*

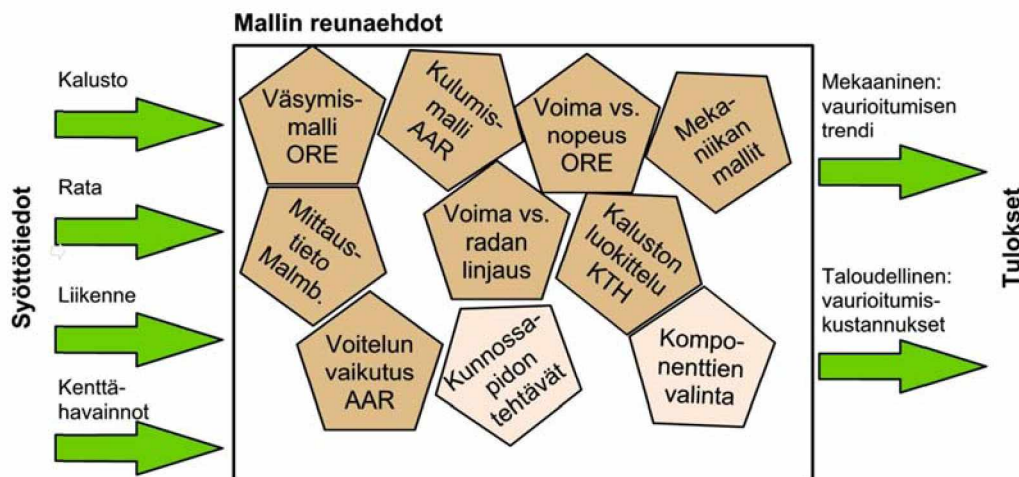
Ruotsalaisten tutkimusten mukaan akselipaino on radan kunnon kehittymisen kannalta määräävin. Esimerkiksi akselipainon nostaminen 16 tonnista 22 tonniin lisää kulumista noin 60 %/brt. Pyöräkerran ohjautuvuus on merkittävä tekijä kulumisen ja vierintäväsymisen kannalta: jäykän telin korvaaminen joustavalla aikaansaa merkittäviä säästöjä. Suurimmat kulumiskustannukset johtuvat raskaista vetureista ja 30 tonnin akselipainosta. Öhberg ja Anderson arvioivat, että rajakustannuksista 25 % muodostuu päällysrakenteen kokonaispainumista, 35 % muodostuu komponenttien väsymisestä ja loppu osa kustannuksista muodostuu vierintäväsymisestä. Mallissa päällysrakenteen painuma ja komponenttien väsyminen ovat verrannollisia pyöräkuorman neliöön. Pyöräkerran ohjautuvuus on merkittävässä roolissa kulumisessa ja vierintäväsymisessä. Raskas liikenne aiheuttaa ensisijaisesti painumista ja komponenttien väsymistä. (Öberg, Andersson & Gunnarson 2007)

Koska DeCAyS -mallissa tehdään tiettyjä oletuksia, se kuvaa keskimääräisiä rataverkon olosuhteita. Malli keskittyy erityisesti suurimpien voimien ja jännityksen vaikutukseen koko ratarakenteen kunnon kehittymisessä. Kaluston kunnon oletetaan olevan ”normaali” toisin sanoen kalusto on uutta vastaavassa kunnossa.

Luulajan teknillisessä yliopistossa tehtyjen tutkimusten perusteella on kehitetty DeCoTrack -malli (Degradation Cost Of Track), jolla simuloidaan radan vaurioitumiskustannuksia liikenteen muutoksen funktiona (kuva 26). Malli on kehitetty sekaliikenteelle. Syöttöparametreina ovat muun muassa akselipaino, vuosittainen liikennemäärä tonneina, kalustotyyppi ja kaluston kunto. (Larsson 2004)

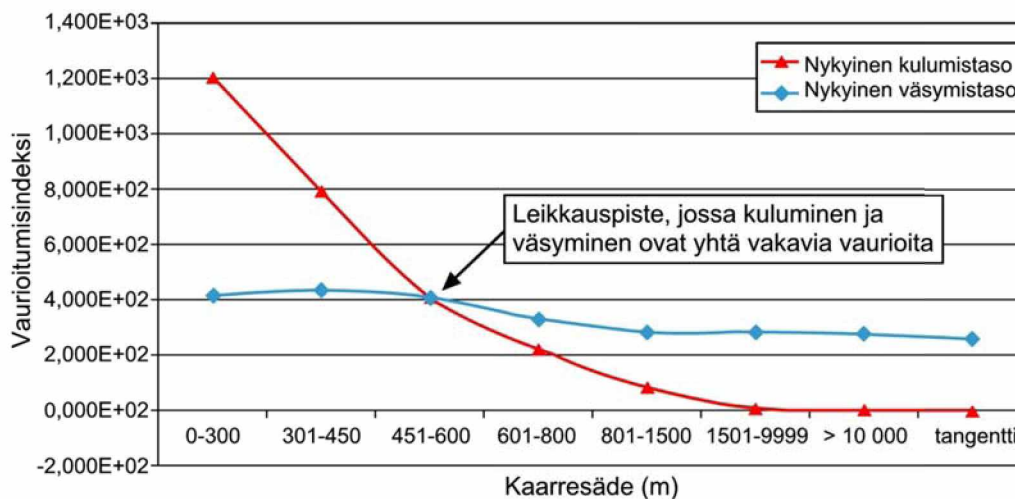
Larsson (2004) toteaa kunnossapidon olevan ratkaisevassa roolissa pitkän aikavälin kustannustehokkuudessa, koska ratarakenteiden investointikustannukset ovat usein suuremmat kuin muissa infrarakentamisen kohteissa. Larsson toteaa myös ruotsalaisten kokemusten perusteella, että radan vaurioitumisen kustannusten laskennassa

tulisi ensisijaisesti keskittyä kiskoon, koska kiskojen uusiminen voi muodostaa jopa enemmän kuin 50 % liikenteeseen liittyvistä kunnossapitokustannuksista.



Kuva 26. Decotrack-mallin periaatekuva. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Larsson 2004).

DeCoTrack -malli rajoittuu päällysrakenteeseen ja peruslähtökohtana on kiskon vaurioitumisen prosessien kulumisen ja väsymisen mallintaminen. Myös Larsson toteaa radan geometrialla ja erityisesti kaarresäteellä olevan suurin merkitys vaurioitumisen kannalta (kuva 27).



Kuva 27. Kuluminen ja väsymisen mekanismi kaarresäteen funktiona. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Larsson 2004).

Larsson esittää radan vaurioitumisindeksille (E) kaavan

$$E = k * T^{\alpha} * P^{\beta} \quad (2)$$

E	Radan vaurioitumisindeksi
k	Tiettyyn rataosaan liittyvä vakio
T	Radan kokonaisliikennemäärä, radan rakentamisesta alkaen
P	Akselipaino

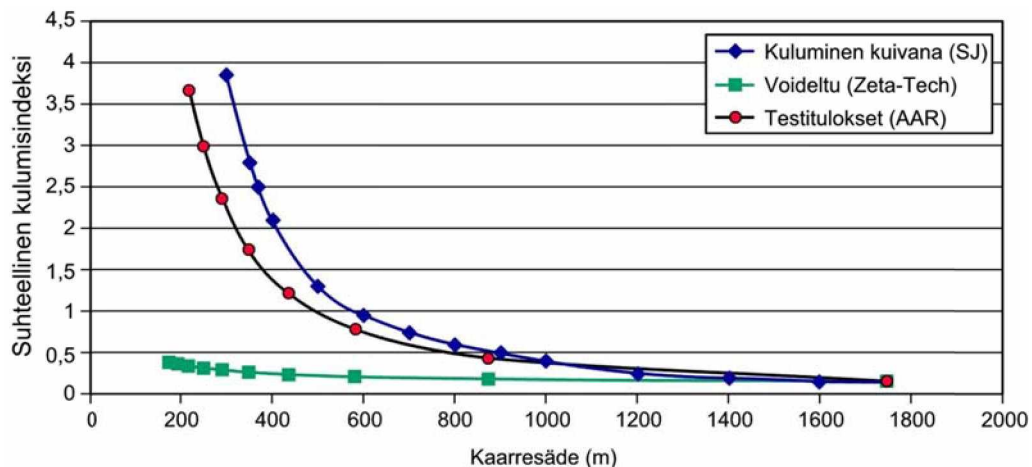
Kaavan (2) eksponenteille on ehdotettu taulukon 12 mukaisia arvoja.

Taulukko 12. Radan vaurioitumisindeksien valintaperusteet, kun vaurioitumisindeksi lasketaan kaavalla (2). Taulukko on käännetty suomeksi julkaisusta (Larsson 2004).

	α	β
Kiskon sisäinen väsyminen ja hitsit	1	3
Kiskon pintaviat	3	3,5
Muut komponentit (päälysrakenne)	3	3
Radan painuminen	1	3

Mallin epävarmuus liittyy kertoimien α ja β määrittämiseen. Kiskon, radan painumisen ja vaihteiden vaurioituminen oletetaan tapahtuvan suhteessa akselipainoon ja kokonaisliikennemäärään. Kun taas tukikerros, kiskojen vaihto, investoinnit, tarkastukset ja muiden radan komponenttien vaurioituminen ovat oletettavasti riippuvaisia vain kokonaisliikennemäärästä.

Larsson esittää mallit ja laskentakaavat sekä kiskon väsymiselle että kulumiselle. Väsymiseen ja samalla painumaan vaikuttavat ensisijaisesti kiskon päällä kulkevan pyöräkerran aiheuttamien voimien amplitudit. Pyöräkerran aiheuttamat kuormat jaetaan staattiseen akselikuormaan, kvasistaattiseen akselikuormaan kaarteissa ja dynaamiseen akselikuormaan. Larsson esittää yhtälön väsymisen aiheuttaman vaurioitumisindeksin laskentaan kaarresäteen ja akselikuorman perusteella. Yhtälössä esiintyvät kalustokertoimet perustuvat KTH:ssä tehtyihin tutkimuksiin. Vastaavasti kulumiselle muodostetaan yhtälö, jonka muuttujina ovat liikennemäärä (akselien ylityskerrat), kaarresäde, kaluston ajokäyttäytyminen ja voitelun määrä (kuva 28).



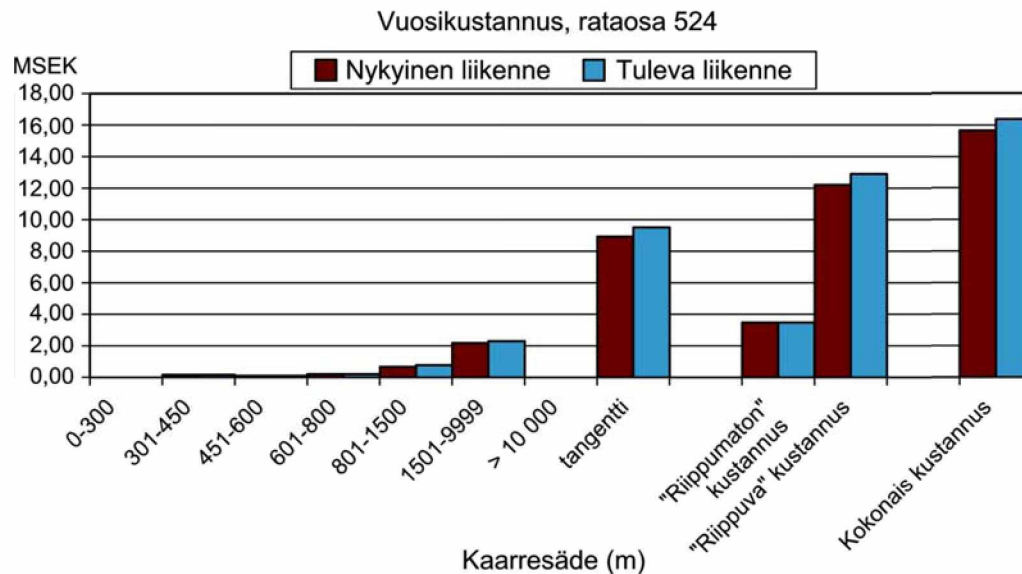
Kuva 28. Kiskon kulumisindeksi kaarresäteen funktiona Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Larsson 2004).

Regressioanalyysin perusteella on laskettu kulumisfunktio kaarresäteen suhteen (3).

$$f(r) = \frac{1}{r^{1,9}} \quad (3)$$

DeCoTrack-mallissa mekaaninen kuluminen muutetaan kustannuksiksi lineaarisella muutoksella teknillisen käyttöiän ja vuosittaisen liikennemäärään perusteella määrytyvien kunnossapitokustannusten avulla. Kunnossapitokustannuksiin lisätään vie-

lä liikennemäärästä riippumattomat kunnossapitokustannukset. Mallin perusteella on laskettu vuosittaisia kunnossapitokustannuksia suhteessa kaarresäteeseen tai tietyn rataosan vuosittaista kulumista prosentteina koko radan käyttöiästä. Kuvan 29 esimerkissä mallilla on laskettu 54 km pitkän rataosan vuosikustannuksia, kun akselipainoa nostetaan 22,5 tonnista 25 tonniin.



Kuva 29. Esimerkkitarkastelu vuosikustannusten kehittymisestä, kun akselipainoa nostetaan 22,5 tonnista 25 tonniin. Kokonaiskustannukset kasvavat 4,2 %. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Larsson 2004).

Larsson on verrannut kehitettyä mallia kirjallisuudesta löytämiinsä kolmeen muuhun mallin. Kirjallisuudessa esitetyt mallit olivat monimutkaisempia kuin kehitetty DeCoTrack. Larssonin tekemien vertailulaskelmien perusteella eri malleilla saadut tulokset ovat kohtuullisen lähellä toisiaan, vaikka mallit ovat lähtökohdiltaan hieman erilaisia. Johtopäätöksissään Larsson toteaa DeCoTrack-mallin olevan sopiva, mutta sisältävän vielä puutteita esimerkiksi kaluston kunnon ja ohjautuvuuden kuvaamisessa suhteessa radan kunnon kehittymiseen. (Larsson 2004)

4.3.4 Itävalta

Itävallassa Graazin yliopiston rautatietutkimusryhmässä on kehitetty radan kunnon kehittymisen malli, jonka peruslähtökohtana on kunnon kehittymisen eksponentiaalinen funktio (3):

$$Q(t) = Q_i * e^{bt} \quad (4)$$

Q(t)	ajan funktiona muuttuva kunto
Q _i	alkuperäinen kunto
b	vaurioitumisnopeus
t	aika

Vaikka malli näyttää yksinkertaiselta, sen kehittämiseen on kulunut useita vuosia ja työ on vaatinut suuren määrän rataverkolta kerätyn tiedon analysointia. Mallin haasteellisuus liittyy vaurioitumisnopeuteen b, joka erillinen funktio, eikä se ole samanlainen kaikilla rataosilla. Mallin lähtökohtana on nykytilan kunnon mittaaminen käyttäen

sekä vertikaalista että horisontaalista geometrista tietoa, toisin sanoen kysymys on matkustusmukavuudesta (riding quality). Oleellisena osana mallin käyttöä on rata-verkon kuntoa kuvaavan MDZ-tekijän laskeminen. MDZ kuvaa radan epätasaisuutta eli radan geometriasta johtuvia vaunurungossa havaittavia poikittaiskiihtyvyyden muutoksia. MDZ lasketaan kaavalla (4). Lyhyellä matkalla tapahtuvat muutokset summataan liukuvaksi keskiarvoksi mitattavalla rataosan pituudella. (Veit, Marschnig 2011)

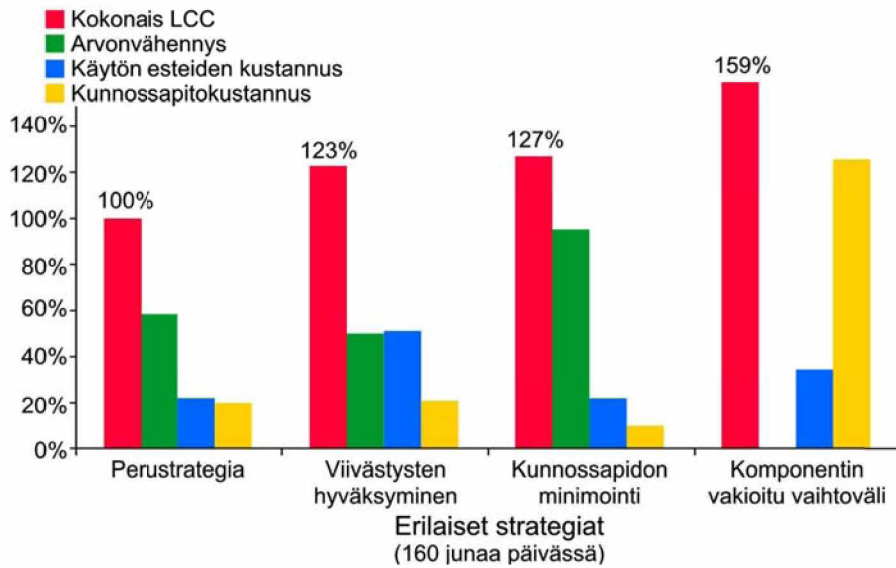
$$MDZ = V^{0,65} \times \frac{1}{L} \times \sum_0^L \sqrt{v^2 + (h + \Delta u)^2} \quad (5)$$

MDZ	ajettavuus
V	nopeus (m/s)
L	matka, jolta liukuva keskiarvo lasketaan (m)
v	pystysuuntainen ratageometriavirhe (mm)
h	vaakasuuntainen ratageometriavirhe (mm)
Δu	kallistuksen virhe (mm)

MDZ poikkeaa yleisesti Euroopassa käytetyistä radan kunnon mittareita siten, että siinä voidaan huomioida sekä vaaka- että pystysuuntaiset geometrian poikkeamat. (Veit, Marschnig 2011)

Malli perustuu tilastollisiin ja matemaattisiin menetelmiin sekä laajaan tietokantaan. Malli sisältää ainakin 3 miljoonaa erilaista vaurioitumisfunktioita, mikä kuvastaa rata-rakenteen monimuotoisuutta. Mallia voidaan soveltaa esimerkiksi radan tukemisen ja muiden kunnossapitotoimenpiteiden optimointiin. Mallin avulla on myös mahdollista laskea esimerkiksi erilaisten ratarakenteen komponenttien muuttamisen, kuten esimerkiksi pölkkyjen pohjaimien vaikutusta vaurioitumiseen ja tukemistarpeeseen. Järjestelmään on kerätty ja kerätään jatkuvasti tietoa Itävallan päärataverkolta noin 4000 km matkalta viiden metrin välein. (Holzfeind, Hummitzsch 2008, Veit, Marschnig 2011)

Edellä kuvattu itävaltalainen järjestelmä auttaa muun muassa strategisessa suunnittelussa, kunnossapidon optimoinnissa ja erilaisten komponenttien vaihtovälien määrittämisessä. Merkittäviä kustannussäästöjä havainnollistaen on kuvassa 30 verrattu järjestelmää norjalaisten toimintatapaan, jossa eri komponenteilla on vakioidut vaihtovälit. Verrattaessa radan kuntotilan mukaan optimoitua kunnossapitostrategiaa vakioituun komponentin vaihtoväliin säästöjä syntyy ensisijaisesti kunnossapitokustannuksissa. Jos kunnossapitotoimenpiteissä säästetään eli tehdään vain välttämätön, säästetään kunnossapitokustannuksissa, mutta toisaalta komponenttien kunnon heiketessä myös niiden arvon vähentymisestä syntyvät kustannus kasvattaa kokonaislinkaarikustannuksia. Jos hyväksytään radan komponenttien heikosta kunnosta johtuva junien viivästymisen, kunnossapitokustannuksissa voidaan saavuttaa pieniä säästöjä, mutta lisäkustannuksia syntyy nimenomaan radan epäkäytettävyydestä.



Kuva 30. Kunnossapitostrategian vaikutus elinkaarikustannuksiin. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Veit, Marschnig 2011).

Itävaltalaisien kehittämä järjestelmä osoittaa, että rataverkolta kerättävällä tiedolla on suuri merkitys, kun kunnan kehittämisen malleja kehitetään. Muuttujana oleva MDZ termi perustuu vaaka- ja pystysuuntaisen kiihtyvyyden ja poikkeamien mittaamiseen, ja se kertoo kaikkien eri ratarakenteen komponenttien vaikutuksesta ratarakenteen kuntoon. Tietyn geometriapoikkeaman aiheuttaja ei näin ollen välttämättä ole selvillä. Tiedon keräämisen pääasia on, että tietoa on saatavissa riittävän tiheästi ja se on talletettu sellaiseen muotoon, jota voidaan matemaattisesti ja tilastollisesti käsitellä. Vasta riittävän suurella tilastollisesti merkittävällä aineistolla voidaan kehittää kunnan kehittämisen funktioita ja päästä eteenpäin elinkaarikustannusten laskennan kehittämisessä.

4.3.5 Iso-Britannia

Network Railin johdolla Iso-Britannian rautatiealan toimijat ovat olleet aktiivisesti mukana yhteiseurooppalaisissa projekteissa ja heidän toimintatapojaan ja malleja on hyödynnetty useissa muissakin tutkimuksissa.

RSSB (Rail Safety and Standard board) on kehittänyt kiskon elinkaarimallin (WLRM, Whole Life Rail Model) (Burstow 2004). Mallia on kehitetty edelleen ja lopputuotteena on Trac-Ex© työkalu, jolla voidaan ennustaa vierintäväsäyssiä syntyä, kulumista ja kiskoprofiilin muutoksia. Track-ex käyttää vaurioiden ennustamiseen kiskopöytäkontaktin energia konseptia (T-gamma), joka on kehitetty jo 1970-luvulla. Mallista on julkaistu useita konferenssiartikkeleita. Track-ex sisältää myös kustannusmallin, jonka avulla voidaan analysoida esimerkiksi erilaisten ratavaihtoehtojen tai kunnossapitostrategioiden välisiä eroja sekä kiskon elinkaarikustannuksia. Ohjelmistossa hyödynnetään aikaisemmin kehitettyjä kiskon vaurioitumisfunktioita. Track-ex hyödyntää geometriamittausten tietoja siten, että vierintäväsäyksen ja kulumisen potentiaali voidaan laskea valitulle rataosalle hyvin nopeasti. (Dembosky, Greenwood & Doherty 2011)

Track-ex kustannusmallin avulla kustannukset voidaan jakaa 50 m pituisille ratajaksoille, laskennassa voidaan tällä hetkellä käyttää 20 erilaista reitti/kalusto analyysiä.

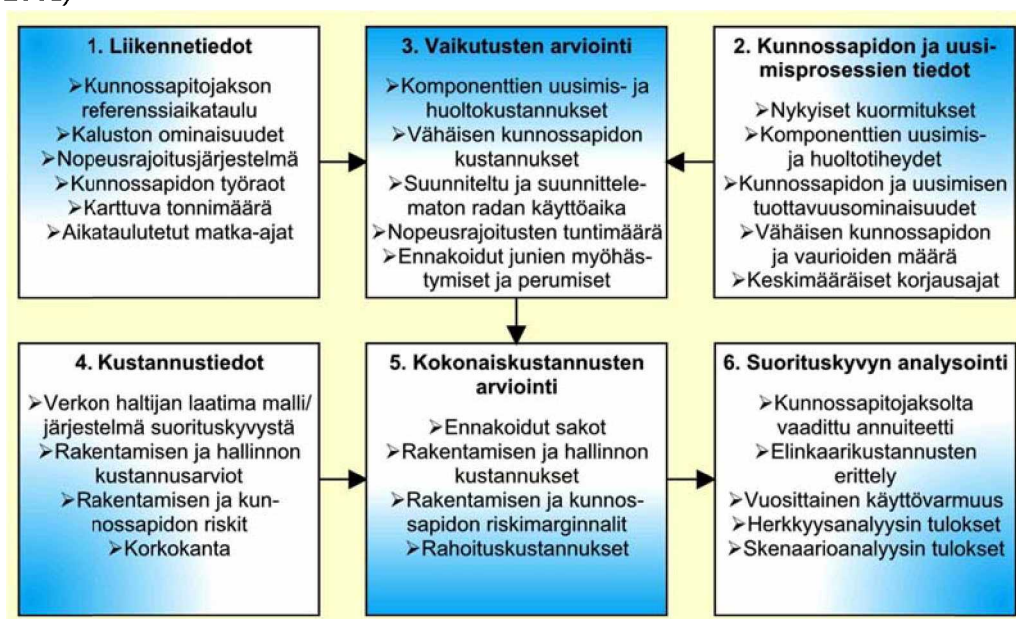
Kustannusmallin avulla voidaan esimerkiksi vertailla eri kiskotyyppien välisiä kustannuseroja. Kustannusmallilla saadut tulokset ovat kuitenkin vielä alustavia, koska esimerkiksi voitelun ja tarkastusten kustannuksia ei ole malliin vielä sisällytetty, myös jotkut tekniset oletukset saattavat tutkimuksen myötä vielä tarkentua. Track-ex mallia kehitetään edelleen, koska se keskittyy tällä hetkellä vain kiskojen kulumiseen ja vierintäväsysteemien. Myös pölkkyjen, sepelin ja vaihteiden kunnon kehittymisen vaikutus kustannuksiin on merkittävä. (Dembosky, Greenwood & Doherty 2011)

VAMPIRE on DeltaRailin kehittämä ja myymä ohjelmisto, jonka avulla voidaan rakentaa dynaaminen malli mistä tahansa kalustosta ja simuloida kaluston käyttäytymistä todellisista rataolosuhteista mitatussa ratageometriassa.

4.4 Tilastolliset ja ekonomistiset mallit

Tilastolliset ja ekonomistiset mallit ovat joko päätöksentekoa tukevia järjestelmiä tai niiden osia tai ne on kehitetty matemaattisten tai tilastollisten menetelmien perusteella rataverkolta mitattuun nyky- ja historiatiedon avulla. Usein malleja on kehitetty koko rataympäristön toiminnan näkökulmasta eli yksittäisen ratarakenteen osan kunnon kehittyminen on vain pieni osa järjestelmää. Malleissa ei yleensä käsitellä mekaanisen käyttäytymisen yksityiskohtia. Puhtaasti elinkaarilaskentaan kehitettyjä kaupallisia ohjelmistoja on useita kymmeniä. Niistä muutamia rataympäristöön soveltuvia ohjelmistoja on listattu liitteen 1 taulukkoon, mutta ohjelmistoja ei käsitellä tässä yhteydessä yksityiskohtaisesti.

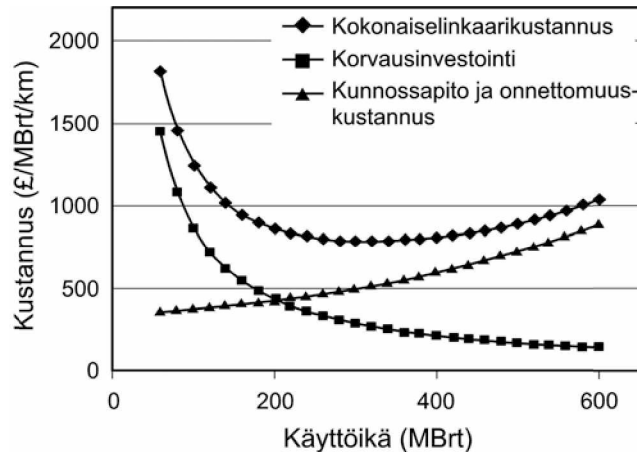
Eräs kattavimmista rautatiejärjestelmän päätöksentekoa tukevan järjestelmän kehittämiseen liittyvistä lähteistä on Zoetemanin vuonna 2004 julkaistu väitöskirja. (Zoeteman 2004) Eräänä osana väitöskirjatutkimuksessa oli järjestelmän prototyypin kehittäminen. Kehitetty DSS-järjestelmä (Decision Support System) on Microsoft Excel-pohjainen järjestelmä, jonka avulla voidaan varioida esimerkiksi suunnittelu- ja kunnossapitoparametreja. Järjestelmän peruserätyypit on esitetty kuvassa 31. (Esveld 2001)



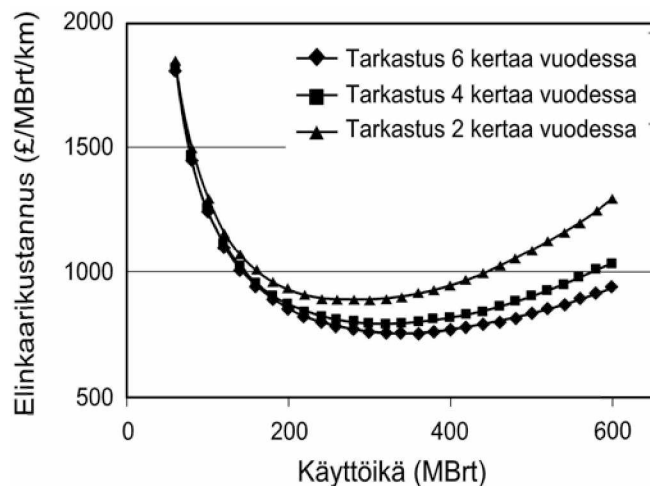
Kuva 31. DSS järjestelmän komponentit. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Esveld 2001),

Hollannissa nopean junaradan rakennevaihtoehtojen tarkastelu tehtiin hyödyntäen DSS-järjestelmää. Hankkeessa havaittiin, että rakenteiden laskentatuloksiin vaikutti erityisesti sakotusjärjestelmä, mikä johti siihen, että myös signaali- ja sähköjärjestelmää oli tarkasteltava. Tulokset olivat myös herkkiä kunnossapitotoimenpiteille asetetuille hälytysrajoille ja kunnossapitajaksojen pituudelle. Lopullinen ratarakennevaihtoehto valittiin elinkaarikustannuslaskentaan perustuen (Esveld 2001)

Stokastista analyysiä on käytetty Isossa-Britanniassa kiskovikojen analysoinnissa kiskon taloudellisen käyttöiän arvioimiseksi (Zhao et al. 2006). Tutkijat esittävät mallin myös tarkastusten aikavälin optimoimiseksi tietyllä aikavälillä havaittujen vaurioiden perusteella. Analyysimenetelmää on testattu yhden kilometrin pituisella rataosalla, jonka liikennemäärä on 10 Mbrt vuodessa. Kuvista 32 ja 33 voidaan havaita kiskon elinkaarikustannusten kasvu, jos tarkastuksia tehdään harvemmin, mutta toisaalta kaavio myös osoittaa, että ennen noin 150 Mbrt käyttöiän täyttymistä vuosittaisella tarkastuskertojen määrällä ei ole juurikaan merkitystä kokonaiskustannusten kannalta. Mitä suurempi on kiskolle tullut kuormitus eli mitä vanhempi kisko on, sitä tärkeämpää on tehdä tarkastuksia useammin.

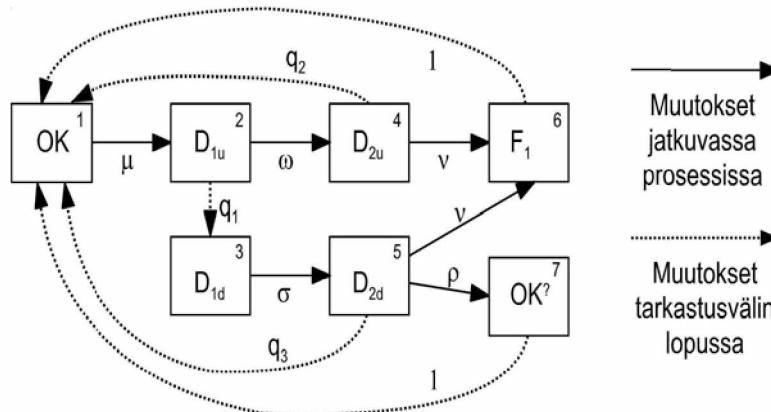


Kuva 32. Kiskon elinkaarikustannukset kuormituksen funktiona. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Zhao et al. 2006)



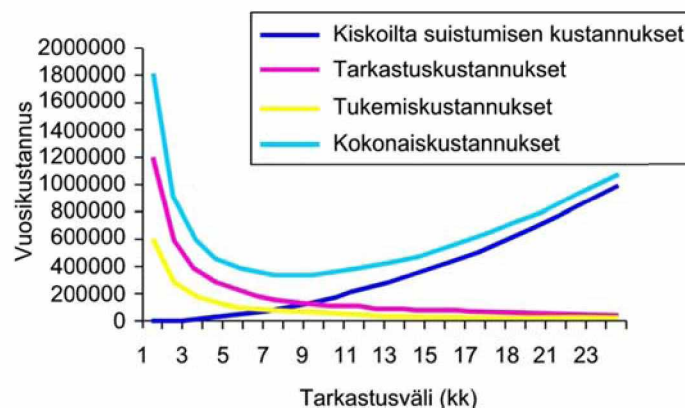
Kuva 33. Tarkastuskertojen lukumäärän vaikutus kiskon käyttöikänsä. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Zhao et al. 2006).

Norjassa on tehty tutkimus ultraäänitarkastusten aikavälin optimoimiseksi rataosalla Trondheim–Oslo. Mallinnuksessa on käytetty Markovin ketjua. Markovin ketjussa kuvataan normaaleja ajan ja kuormituksen mukaan kehittyviä vaurioitumisprosesseja, kiskon äkillistä vaurioitumista ei tässä tapauksessa ole huomioitu. Markovin ketjun komponenteista muodostetaan matriisi, jonka koko määräytyy komponenttien lukumäärän mukaan (kuvan 34 mukaisesta mallista saadaan 7×7 matriisi). Markovin ketjun ratkaisussa käytetään laskentaohjelmistoa, jonka tuloksena saadaan erilaisille vaurioitumisprosesseille todennäköisyysfunktio. Vastaavalla tavalla voidaan laatia Markovin ketjut ultraäänitarkastuksille ja kunnossapidolle.



Kuva 34. Kiskon vaurioitumista mallintava Markovin ketju. Kreikkalaisilla kirjaimilla on kuvattu eri kuntotilojen välistä muutosnopeutta. Kirjaimella D kuvataan kuntotilaa ja kirjain F kuvaa vaurioitunutta tilaa. Pienillä q kirjaimilla kuvataan todennäköisyyttä. (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008)

Mallia on testattu Trondheim–Oslo rataosan tiedoilla, pääosa lähtötiedoista on saatu rekistereistä, mutta osa tiedoista perustuu asiantuntija-arvioon. Menetelmään on käytetty esimerkiksi geometrisen kunnan tarkastusvälin optimoinnissa. Kuvassa 35 esitetyn laskentatuloksen mukaan tarkastusvälin kasvattaminen 8–9 kuukauteen nykyisen 6 kk sijasta säästää tällä rataosalla kustannuksia 20000 NOK vuodessa.



Kuva 35. Kiskojen tarkastusvälin optimointi kustannusten perusteella. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008).

Network Railin kehittämä järjestelmä T-SPA (Track Strategic Planning Application) perustuu Isossa Britanniassa kerättyyn kustannus- ja investointitietoon. Työkalu so-

veltuu erityisesti pitkän tähtäimen suunnitteluun. TSPA on sisällytetty myös VTISM (Vehicle Track Interaction Strategic Model) työkaluun. (Wheat, Smith & Nash 2009)

4.5 Herkkyys- ja epävarmuustarkastelut

Herkkyystarkastelulla tarkoitetaan laskelmien kannalta kriittisten tekijöiden epävarmuuden arviointia. Yksinkertaisimmillaan herkkyystarkastelu voidaan tehdä tarkastelemalla esimerkiksi tarkastelemalla lähtötietojen vaikutusta laskemien tuloksiin jollakin realistisella vaihteluvälillä.

Elinkaariarvioinnissa epävarmuus voidaan Spielman et al. (2005) mukaan jakaa kolmeen luokkaan:

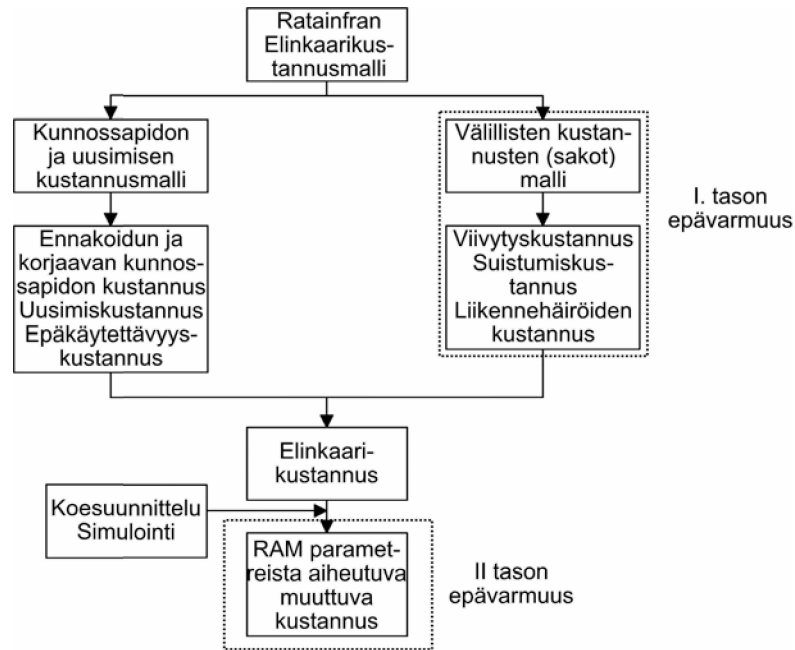
- Tekniset epävarmuustekijät, jotka liittyvät lähtötietojen laatuun
- Valittuun menetelmään liittyvät epävarmuustekijät, jotka liittyvät esimerkiksi mallin pohjana käytettyyn luokittelu- tai kuvausmenetelmään (esimerkiksi vakapuu tai Markovin ketju)
- Tutkittavan järjestelmän ja mallin yhteensopivuuden epävarmuustekijät, toisin sanoen mallin ja todellisten olosuhteiden vastaavuuteen liittyvät tekijät (Spielmann et al. 2005)

Innotrack projektissa elinkaariarviointiin liittyvät epävarmuudet luokiteltiin seuraavasti:

- Tarvittavien laskentaparametrien epävarmuus eli osittain puutteelliset lähtötiedot
- Laskentaparametrien arvojen epävarmuus, kun käytetään uusia komponentteja tai järjestelmiä
- Komponenttien käyttöikä, vaurioitumisnopeus tai kunnossapitokertojen väli eivät ole vakioita, vaan niillä on joku todennäköisyysjakautuma (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)

Elinkaarikustannuslaskennan epävarmuuden arviointi on näin ollen monitahoinen prosessi ja sen toteuttaminen vaatii yleensä kehittyneempien laskentamenettelyiden käyttöä, koska elinkaarimalli on jo itsessään kompleksinen kokonaisuus.

Kuvassa 36 on esitetty esimerkki elinkaarilaskennan epävarmuuden luokittelusta. Kuvassa on esitetty kaksi epävarmuuden tasoa, joista ensimmäinen liittyy junan myöhästymisestä, liikennehäiriöistä ja radalta suistumisesta syntyviin sakkomaksuihin. Sakkokustannusten syy voi olla suunnitelluissa tai suunnittelemattomissa kunnossapitotoimenpiteissä tai kunnossapidon puutteissa. Ensimmäisen tason epävarmuutta voidaan pitää elinkaarilaskennan ulkoiseksi riskinä. Toisen tason epävarmuus liittyy toimintavarmuuden, käyttövarmuuden ja kunnossapidettävyyden epävarmuustekijöihin. Perinteinen elinkaarianalyysi sisältää vain pistemäisiä ennusteita (annetaan vain yksi arvo) toisen tason epävarmuustekijöistä. Toisen tason epävarmuustekijät vaikuttavat tosin myös ensimmäisen tason tekijöihin. Toisen tason epävarmuustekijöille on kuitenkin mahdollista antaa myös tilastollisesti määritettyjä jakautuma-arvoja pistemäisten sijaan. Epävarmuuden laskennassa on käytetty DoE-menettelyä (Design of Experiment - koesuunnittelu) ja Monte Carlo simulointia. Menettelyä on testattu Ruotsissa Malmbanalla, jossa saadut tulokset osoittivat, että menettely on käyttökelpoinen, mutta vaatii vielä kehittämistä ennen kuin sitä voidaan soveltaa rutiinina. (Patra, Söderholm & Kumar 2009)



Kuva 36. Elinkaariarvioinnin epävarmuudet. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Patra, Söderholm & Kumar 2009),

Epävarmuus- ja herkkyystarkastelujen lähtötiedot on aina analysoitava huolellisesti, koska lähtötietojen luonne ratkaisee sen millaista menettelyä voidaan käyttää. Esimerkiksi todennäköisyyksille voidaan käyttää vain, jos lähtötiedoissa ei ole havaittavissa trendiä tai ne eivät ole keskenään toisistaan riippuvaisia. Jos trendi tai keskinäinen riippuvuus on havaittavissa, analysoinnissa tulee käyttää esimerkiksi potenssijakautuma mallia. (Patra, Söderholm & Kumar 2009)

Australialaisen ITDM mallin epävarmuustekijöitä on arvioitu siten, että on tarkastelu vain kahta merkittävintä kiskon kulumiseen vaikuttavaa parametria eli akselipainoa ja junan nopeutta. Muilla tekijöillä, kuten maapohjan jäykkyydellä, tukikerroksen paksuudella, sepelin moduulilla oli selkeästi pienempi vaikutus kiskon kulumiseen. Vaihtelemalla akselipainon ja liikennöintinopeuden arvoja saatiin pahimman mahdollisen tapauksen skenaario. Esimerkiksi kymmenen prosentin virhe akselipainossa ja nopeudessa aiheutti 4,2 % vaihtelun kulumisessa. (Zhang, Murray & Ferreira 2000).

4.6 RAMS ja elinkaarilaskenta

RAMS eli toimintavarmuus, käyttövarmuus, kunnossapidettavuus ja turvallisuus sekä elinkaarikustannuslaskenta liittyvät toisiinsa, mutta niiden yhdistäminen toimivaksi järjestelmäksi koko rataympäristössä on haastava tehtävä. Toimintavarmuus ja kunnossapidettavuus ovat parametreja, jotka voidaan määrittää sekä yksittäisen komponentin että koko järjestelmän tasolla, kun taas käyttövarmuus ja turvallisuus ovat järjestelmätason parametreja. Laajimmat RAMS:n ja elinkaarilaskennan yhdistämiseen liittyvät tutkimukset on toteutettu Innotrack-projektissa ja Luulajan teknillisessä yliopistossa.

Sekä elinkaarikustannuslaskennassa että RAMS analyysissä on kysymys järjestelmällisestä ratarakenteen komponenttien, niiden toiminnan ja kustannusten hallintame-

nettelystä. RAMS teknologian avulla voidaan ennakoida komponentin tai järjestelmän toimivuutta koko elinkaaren aikana. Yhdistämällä RAMS ja elinkaarikustannuslaskenta saadaan esimerkiksi vastaus kysymykseen, millaiseen toimintavarmuuden tasoon päästään tietyn tasoilla elinkaarikustannuksilla. Menetelmien soveltamisen lähtökohtana on aina tutkittavan komponentin tai projektin yksityiskohtainen määrittely sekä toiminnan että tavoitteiden osalta. Taulukossa 13 on esitetty elinkaarilaskennan ja RAMS-analyysin pääparametrit. Elinkaarikustannuslaskenta-prosessin laajuuden perusteella valitaan taulukosta kriittisimmät parametrit laskentaa varten. Esimerkiksi yksinkertaisessa laskelmassa, jossa ei huomioida viivytyksiä tai liikenteen keskeytyksiä, valitaan laskennan parametreiksi vain keskimääräinen vaurioiden välinen aika sekä korjaus- ja kunnossapitokustannukset. Jotta RAMS-analyysiä voitaisiin hyödyntää, on oltava käytettävissä tiedot taulukon mukaisista parametreista. (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)

Taulukko13. Elinkaarilaskennan ja RAMS-analyysin pääparametrit. Taulukko on käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack Guideline D6.5.4 2006)

Toimintavarmuus Reliability	Käyttövarmuus Availability	Kunnossapidettävyyys Maintainability	Turvallisuus Safety
Keskimääräinen vaurioiden välinen aika korjaavassa kunnossapidossa	Junien myöhästymistunnit	Keskimääräinen korjaukseen käytetty aika	Vikataajuus
Keskimääräinen kunnossapitotoimenpiteiden aika-väli ennakoivassa kunnossapidossa	Henkilömatkustus-suorite	Korjaukseen kuluva aika	Radalta suistumisten määrä
Keskimääräinen liikenteen sujuvuuteen vaikuttavien vaurioiden aikaväli		Keskimääräinen kunnossapitoon kuluva aika	Onnettomuuksien määrä
		Keskimääräinen liikenteen keskeytys-aika	

Luulajan teknillisessä yliopistossa tehdyssä lisensiaattityössä on tutkittu RAMS:n ja elinkaarikustannusanalyysin yhdistämistä kunnossapidon suunnittelussa. Työhön on koostettu tiedot Euroopassa tehdystä tutkimuksesta, käytettävissä olevista ohjelmistoista ja työkaluista sekä hahmoteltu RAMS-laskentaan tarvittavien tietokantojen rakennetta ja sisältöä. Esimerkiksi kiskon osalta laskentaa varten koottavassa tietokannassa tulisi olla tiedot vaurioista (tyyppi ja laatu), hionnasta, tarkastusten tuloksista, kiskojen iästä ja historiatiedot esimerkiksi kiskojen katkeamisista. Tutkimuksessa havaittiin, että RAMSin ja elinkaarilaskennan käyttö kunnossapidon suunnittelussa on Euroopassa vielä varsin harvinaista. (Patra 2007)

Väitöskirjassaan Patra (2009) on soveltanut Petri Net -tekniikkaa ja Monte Carlo -simulointia erilaisiin rataympäristön sovellutuksiin sekä käytettyjen analyysimenetelmien epävarmuuden laskentaan. Kehitettyjen mallien avulla pystyttiin esimerkiksi laskemaan todennäköisyyksiä havaitsematta jääneille kiskon katkeamisille ja kiskoil-tasuistumiselle. Vaurioiden todennäköisyyttä eli riskiä voitiin arvioida optimoimalla esimerkiksi tarkastusvälin pituutta tai korvausinvestointien ajankohtaa. (Patra 2009)

5 Suomen ratarakenteista saatavilla oleva tieto

Esveldin (2001) mukaan radan elinkaarikustannusten laskemiseen tarvitaan tietoa niin rakentamisesta, kunnossapidosta kuin radan käytöstä. Tärkeimpiä kerättäviä tietoja ovat rakentamisen kustannukset, kunnossapitohistoria ja sen kustannukset, simulointi-, mittaus- ja tutkimustulokset sekä asiantuntija-arviot.

Lähtötietoina radasta mitattavat parametrit ovat joko mekaanisia tai geometrisia. Geometriset parametrit muuttuvat yleensä nopeammin kuin mekaaniset. Geometriset parametrit voidaan yleensä myös korjata melko nopeasti ja kohtuullisen yksinkertaisilla menetelmillä, kun taas mekaanisten parametrien muutokset vaativat yleensä suurempia korjaustoimenpiteitä, kuten esimerkiksi kiskon tai pölkkyjen korjausta tai vaihtoa. (Andrade 2008)

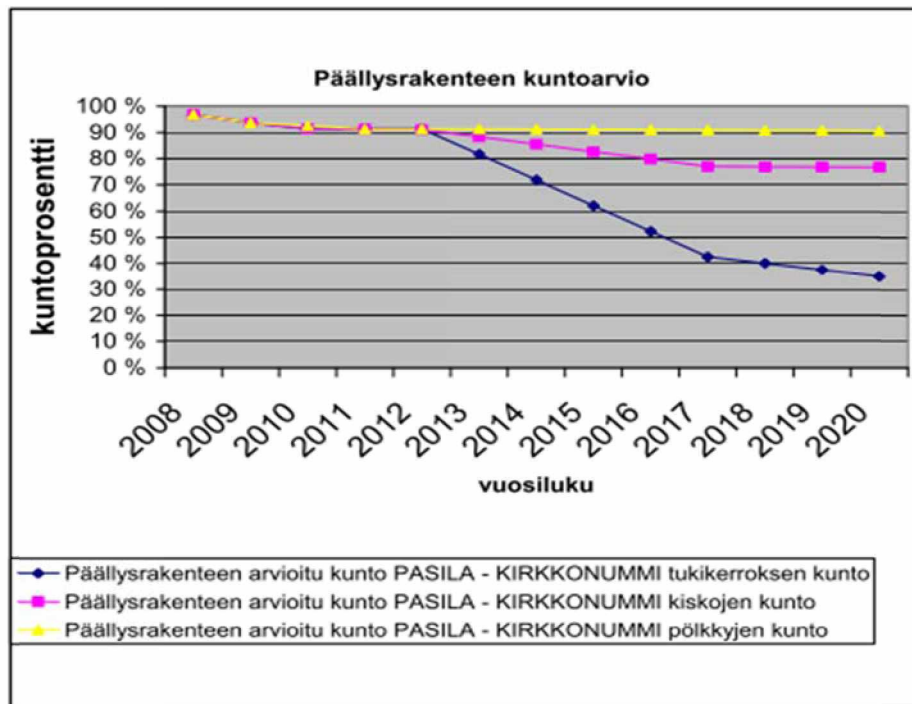
Tiedon keräämisen tavoitteena on reaaliaikaisen tiedon kerääminen siten, että rataa kohdistettavat kunnossapitotoimenpiteet samoin kuin investoinnit pystytään kohdentamaan elinkaaritaloudellisesti oikeisiin kohteisiin. Oleellisena osan tiedon keräämistä tulee olla myös kunnan kehittymisen mallintaminen siten, että voidaan hyvissä ajoin ennakoida tarvittavia toimenpiteitä.

Rataverkon kuntoa mitataan Suomessa sekä mittauskalustolla että rataisännöitsijöiden ja kunnossapitajien toimesta erilaisilla tarkastuksilla. Myös erilaisten tutkimushankkeiden lopputuloksena saadaan lisää tietoa rataverkon kunnosta. Rataympäristössä turvallisuus on aina ensisijainen asia, joten kaiken tarkastustoiminnan pitää olla säännöllistä ja riittävän ajantasaista.

5.1 Elinkaariselvitykset

Suomessa on tehty 2000-luvulla järjestelmällisesti elinkaariselvityksiä rataosittain. Selvityksiä ovat tehneet pääasiassa rataisännöitsijät Liikenneviraston ohjeiden mukaan. Tässä tutkimuksessa käytiin läpi yhteensä 69 elinkaariselvitystä. Elinkaariselvityksissä on esitetty yleensä tarkastellun rataosan nykytila ja arvioitu rakenteiden kunnan kehittymistä tulevaisuudessa. Nykytilan arviointi on perustunut tekijöiden omiin arvioihin ja haastatteluihin sekä raiteentarkastustulosten tai muiden rekistereiden tietojen tulkintaan. Tulevan kunnan kehittymisen arvioinnissa käytettyjä menetelmiä ei ole määritelty tarkasti. Tulevaisuuden arvioinnissa onkin havaittavissa erittäin paljon hajontaa. Muutamat selvitykset ovat erinomaisia, mutta valitettavasti osa selvityksistä ei sisällä lainkaan tulevan kehityksen arviointia tai arviointi on tehty hyvin suppeana. Myös elinkaariselvitysten kustannusten arvioinnissa on hajontaa, erityisesti kunnossapitokustannusten arviointi on ollut hankalaa.

Jos kunnan kehittymisen arviointi on tehty, arvio perustuu lineaariseen ajan funktiona tapahtuvaan kunnan heikkenemiseen. Yleensä rata- tai rakenneosan käyttöiän päättymiskriteerinä on käytetty nykyisissä ratateknisissä ohjeissa käytettyä käyttöikätaavoitetta. Esimerkki hyvin tehdystä elinkaariarvioinnista ja sen perusteella laaditusta päällysrakenteen kunnan kehittymisestä on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Rataosan 1104 Pasila-Kirkkonummi päällysrakenteen kuntoarvio. (Nieminen, Jokiniemi 2007).

Elinkaariselvitysten tulisi olla päätöksentekoa tukevia dokumentteja, mutta niiden laadullinen hajonta voi vaikeuttaa esimerkiksi kunnossapitotarpeiden arviointia. Tämän muotoisten elinkaariselvityksen tekemiseen tarvittaisiin yhtenäisempi esitysmuoto sekä selkeä kriteeristö kunnon kehittymisen arviointiin. Lineaaristen kunnon kehittymisen mallien sijaan tarvitaan yksityiskohtaisempaa tietoa niistä indikaattoreista, jotka kuvaavat kunnon kehittymistä eikä vain yleistä arvioita tilanteesta. Koko rataosasta tehty elinkaariselvitys saattaa myös joissakin tapauksissa keskiarvoistaa liikaa pitkän rataosan vaihtelevia olosuhteita. Rataosalle mahtuu useita erilaisia osia, joiden kunnon kehittyminen ei välttämättä ole samanlaista.

Elinkaariselvitysten lisäksi tulisi keskittyä kuntotiedon järjestelmälliseen keräämiseen, mikä seikka on toteutumassa Ratapurkin käyttöönoton myötä. Toki ratapurkki ratkaisuna on vasta ensimmäinen askel kohti järjestelmää, jonka avulla voidaan optimoida kunnossapitoa tai investointien tarvetta. Useat kansainväliset tutkimukset myös osoittavat, että radan rakenneosien kunnon kehittyminen ei ole lineaarista vaan enemmänkin eksponentiaalista. Kunnon kehittymiseen voidaan vaikuttaa kunnossapidolla, lineaariseen kunnon kehittymiseen tulee vähintäänkin tehdä kulmakertoimen muutos kunnossapidon seurauksena.

5.2 Ratapurkki ja muut tietovarastot

Ratapurkki-järjestelmä on ratatiedon tietovarasto ja sen kehittämistä on tehty usean vuoden ajan. Ratapurkin tarkoituksena on yhdistää tällä hetkellä useissa eri rekistereissä hajallaan oleva ratatieto (taulukko 14). Ratapurkki-järjestelmän avulla on tarkoitus kerätä ajantasaista ja yhteismitallista tietoa kaikista rataan liittyvistä toimenpiteistä, kuten rakentamisesta, kunnossapidosta ja ylläpidosta (rataisännöinti). Uu-

den tietohallintajärjestelmän käyttöönotto on mittava prosessi ja erityisen tärkeitä ovat kerättävän tiedon yhteismitallisuus ja laatu, koska esimerkiksi päätöksentekoa tukevan raportoinnin lähtötietojen puutteellisuus tai virheellisyys voi johtaa esimerkiksi liian pieniin tai liian suuriin kunnossapito- tai investointitoimenpiteisiin. (Haapalahti, Seppä & Laine 2010)

Ratapurkista on tarkoitus tuottaa raportteja ratatiedoista, radan kunnosta ja vioista. Erityisenä haasteena edellisten lisäksi tulevat olemaan esimerkiksi kunnossapitäjien sisäisten raportointijärjestelmien yhteensopivuus ratapurkin kanssa. Tiedon laatua varten on vielä kehitettävä yhteismitallisia mittaus- ja kirjaamistapoja. Haapalahti et. al. toteavat raportissaan, että Ratapurkin lisäksi tietoa tullaan jatkossakin keräämään kunnossapitäjien omiin järjestelmiin. Loppujen lopuksi tavoitteena on kuitenkin pystyä tuottamaan luotettavia kuntoanalyyskejä päätöksenteon perusteiksi ja tueksi. (Haapalahti, Seppä & Laine 2010)

Koska ratatiedon hallinta on kansainvälistenkin kokemusten mukaan erittäin monimutkainen ja aikaa vievä prosessi, on mahdotonta toteuttaa kaikkea yhdellä kertaa. Erityisesti yksilöidyn ja luotettavan tiedon kerääminen kunnan kehittymisestä ja kustannuksista on suuri haaste. Haapalahti et. al (2010) esittääkin raportissaan yhtenä tulevaisuuden mahdollisuutena yksittäisten vain esimerkiksi yhden ratakomponentin hallintaan ja optimointiin perustuvien ohjelmistojen käyttöä yhteensopivana osana Ratapurkki-järjestelmää.

Suomalaisen ratarakenteen kunnan kehittymistä kuvaavista kuntoindekseistä on tehty myös yhteenvetoraportti. Kuntoindeksit on määritetty Euroopan rautatietutkimuslaitoksen (ERRI) ja UIC:n julkaisuista sekä pohjoismaisista lähteistä. Erilaisia kuntoindeksejä on määritetty kiskoille (8 kpl), ratapölkkyille (6 kpl) vaihteille (5 kpl) ja tukikerrokselle (7 kpl). Kuntoindeksien laskenta perustuu yleensä liikennemäärään (Mbrt) ja eri komponenteille asetettuihin ajan tai kuormituksen suhteen arvioituihin kulumis- tai vaurioitumisrajoihin. (Ojanperä 2006)

Paavilainen (2009) on raportissaan kerännyt tietoa rataverkon kunnan ja sen liikenteellisen vaikutuksen visualisoinnin mahdollisuuksista. Raportissa on myös kuvattu tiedonhallintaprosessien kehittämistarpeita. Työssä on pohdittu millaista visuaalista tietoa on mahdollista tuottaa nykyisin käytettävissä olevien tietojen avulla. Tutkijat ovat työssään hyödyntäneet rataosittain käytettävissä olevaa elinkaaritietoa ja hahmotelleet kunnan kehittymistä rataosittain, erityinen painopiste työssä on ollut kunnan kehittymisen peilaaminen liikenteellisiin tekijöihin. Lähtökohtana tarkastelulle on ollut rataverkon hierarkkinen rakenne, toisin sanoen yksittäisen komponentin kunnosta on johdettavissa esimerkiksi rakenneosan kuntotaso. Työssä ei kuitenkaan huomioida yksittäisten komponenttien kunnan vaikutusta muiden komponenttien kunnan kehittymiseen, mikä seikka on kuitenkin erittäin merkityksellinen koko ratarakennetta ja sen elinkaarta tarkasteltaessa, vaikuttaahan esimerkiksi pölkkyjen kunto suoraan tukikerroksen kuntoon ja päinvastoin. Kunnan indeksoinnin lisäksi tarvitaan aikariippuvaista dynaamista tietoa kunnan kehittymisestä, mikä toisaalta voi perustua vain mitattuun tietoon ja sen simulointiin. (Paavilainen 2009)

Taulukko14. Suomen rataverkosta saatavilla olevan tiedon rekisterit.

Rekisteri	Sisältö
Rautatietilasto	Vuosittain ilmestyvä rautatieliikenteen ja rataverkon tilasto.
Rataverkon kuvaus	Kuvaus sisältää rataverkon perustiedot voimaantulopäivän tilanteen mukaan.
Radantarkastustiedot	Radantarkastustuloksien perusteella kaksi kertaa vuodessa laadittava raportti rataverkosta ja sen kunnosta.
Rataverkon luokittelu	Meneillään oleva hanke, EN-standardien mukainen ratojen luokittelu.
Pääraiderekisteri	Pääraiteiden ominaisuustiedot, ylläpidetään jatkuvasti
Sivuraiderekisteri	Sivuraiteiden ominaisuustiedot, ylläpidetään jatkuvasti.
Vaihderekisteri	Vaihteiden ominaisuustiedot. Rekisterin tietojen perusteella tuotetaan vaihteiden hallintaraportti vuosittain.
Raidegeometriarekisteri	Tietokanta, johon on koottu raiteiden vaakageometriaelementtien tiedot. Kattavuus 2535 ratakilometriä ja 3260 raidekilometriä.
Kiskovikarekisteri	Vuosittain päivittyvä rekisteri, jonka tietojen perusteella tuotetaan kiskovikojen hallintaraportti vuosittain. Tietoja on kerätty vuodesta 2006 lähtien ja ne perustuvat ultraääni- ja kävelytarkastuksiin.
Routapaikkarekisteri	Routa-aikana (marras-heinäkuu) päivitettävä rekisteri, jonka tietojen perusteella tuotetaan roudan hallintaraportti vuosittain. Sisältää myös tiedot myös aiempien vuosien routapaikoista ja routimisen arvioituista syistä
Kallioleikkausrekisteri	Sisältää kallioleikkausten sijainti- ja mittatiedot sekä tietoja lujitusrakenteista, kalliolaadusta, tarkastuksista, kunnossapitotöistä ja korjauksista.
Tunnelirekisteri	Sisältää tunneleiden sijainti-, mitta-, ratapohja-, lujitusrakenne-, kalliolaatu-, tarkastus-, kunnossapitotyö-, korjaus- ja korjaustarvetiedot sekä tiedot tunnelissa olevista teknisistä järjestelmistä. Rekisterin tietojen perusteella laaditaan vuosittainen hallintaraportti.
Siltarekisteri	Sisältää siltien sijainti-, omistaja-, siltatyypin-, rakenne-, rakennetyypin-, tarkastus-, kunto- ja korjaustarvetiedot. Rekisterin tietojen perusteella laaditaan vuosittainen hallintaraportti.
Rumpurekisteri	Sisältää rautatierumpujen sijainti-, omistaja-, rumputyyppi-, rakenne-, tarkastus-, kunto-, vaurio-, korjaustarve- ja tilatiedot. Rekisterin tietojen perusteella laaditaan vuosittainen hallintaraportti.
Tasoristeysrekisteri	Sisältää tasoristeysten sijainti-, tila-, poistopäivämäärä-, nimi-, tien laji-, tien nimi-, tien numero- ja tievaroitustietojen tyypitiedot sekä tiedon käyttöohjeesta ja tietojen muutospäivästä. Lisäksi talletetaan mm. tieliikennemerkki-, portaali-rakenne-, junanopeus- ja liikennöintimäärätietoja mikäli ne ovat saatavilla. Rekisterin tietojen perusteella laaditaan tasoristeysten vuosiraportti.
Pehmeikkörekisteri	Rekisterin perustietoina ovat sijainti-, pehmeikön pituus-, pengerpainuma- ja perustamistapatilannetiedot sekä inklinometriputkien seurantatiedot sekä mahdolliset asiaan liittyvät piirustusnumerot. Lisäksi sisältää pehmeikön laskenta- ja analysointitietoa.
Minirapsu	Taulukko kiskotus-, pölkytys- ja sepelöintivuosisista ratakilometritarkkuudella pääraiteilta.
Pohjatutkimusrekisterit	GTK:n tekeillä oleva julkinen rekisteri pohjatutkimustietojen hallintaan. Liikennevirasto osallistuu.
Piirustusarkistot	Liikenneviraston rautatiealan teknisten piirustusten arkisto

6 Kunnan kehittyminen rakenneosittain

Ratarakenteiden kunnan kehittymistä voidaan tarkastella teknisellä tasolla lähtien liikkeelle yksittäisen ratarakenteen osan kunnan kehittymisestä. Koska radan rakenneosat ovat kiinteässä vuorovaikutussuhteessa keskenään, myös niiden vaurioitumismekanismit liittyvät osittain toisiinsa. Ratarakenteen kunnan kehittymisen liittyy myös kiinteästi kaluston ja rakenteen välinen vuorovaikutus. (Wheat, Smith & Nash 2009). Esimerkiksi ratarakenteen kunnan kehittymisen mekanismien tunteminen on eräs kunnossapidon optimoinnin perusedellytyksistä. Vaikka rakenneosittain tehtävä tarkastelu on haastavaa, on se kuitenkin lähtökohta erilaisten vaurioiden kehittymisen tarkasteluille ja elinkaaritaidellisuuden arvioinnille. Kunnan kehittymisen ja elinkaarikustannusten välisten riippuvuuksien selvittämiseksi on oltava käytettävissä luotettavat lähtötiedot radasta, kalustosta ja liikenteestä.

Tässä luvussa tarkastellaan ratarakenteen eri osien toimintaa ja kunnan kehittymistä lähtien liikkeelle nykyisistä suomalaisista teknisistä vaatimuksista ja arvioidusta rakenneosan käyttöiästä RATO-ohjeiden perusteella. Vaurioitumismekanismeja on tarkastelu ensisijaisesti suomalaisen ratarakenteen näkökulmasta. Lisäksi kansainvälisestä kirjallisuudesta on poimittu yksittäisiin ratarakenteen osiin liittyviä elinkaaritaidellisuustarkasteluja.

6.1 Radan alus- ja pohjarakenteet

6.1.1 Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit

Radan *alusrakenne* koostuu välikerroksesta, eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta, routalevystä ja tärinäeristeistä. Eristys- ja välikerros voivat olla myös samaa rakennetta. Radan pengertäyte ei kuitenkaan kuulu alusrakenteeseen vaan se on pohjarakenteen osa. *Pohjamaa* on ratapenkereen alla oleva maa. Ratarakenne voi olla perustettu suoraan pohjamaan varaan tai erilaisten pohjarakenteiden, kuten paalulaatan varaan. *Pohjarakenne* on siis pohjamaan kantavuuden parantamiseksi, maastonmuotojen tasaamiseksi tai radan muun rakenteen tai pohjamaan suojaamiseksi tehty rakenne. Pohjarakenteisiin luetaan kuuluvaksi myös routasuojaus- tai kuivatusrakenteet. (Ratatekniset ohjeet. Osa 3 2008)

Pohjamaan ja pohjarakenteiden tehtävänä on kantaa kaikki yläpuolisista rakenteista tulevat kuormitukset siten, että alus- ja pohjarakenteiden sekä niiden varassa olevien rakenteiden painumat ja siirtymät ovat raiteen turvallisen liikennöinnin kannalta riittävän pieniä ja sellaisia, että pohjamaan ja radan rakenteiden varmuus sortumista, murtumista ja halkeilua vastaan on riittävän suuri. (Trafi/14473/03.04.02.00/ 2010)

Alusrakenteet siirtävät ja jakavat liikenteestä ja rakenteiden painosta tulevan kuormituksen alempiin kerroksiin tai pohjamaan. Radan alusrakenteen tehtävänä on toimia tukevana perustana radan päällysrakenteelle. Alusrakenne myös tasoittaa alapuoliseen pohjamaan kohdistuvaa kuormitusta, suojaa pohjamaata jäätymiseltä, estää rakennekerrosten ja pohjamaan sekoittumisen ja mahdollistaa radan rakenteen kuivatuksen. (Ratatekniset ohjeet. Osa 3 2008) Vanhat alusrakenteet on rakennettu luonnon lajittamasta hiekasta tai sorasta. Uusien ratojen alusrakenteet voidaan rakentaa myös kalliomurskeesta. Alusrakenteissa käytettävien materiaalien nykyiset rakeisuusvaatimukset on esitetty InfraRYL (2010) asiakirjassa. Kalliomurskeesta ra-

kennetut eristys- ja välikerrokset rakennetaan paksummiksi ja murskeen lujuuden tulee täyttää InfraRYL (2010) esitetty iskunkestävyyden ja hiovan kulutuksen keston vaatimukset. Alusrakennekerrosten tiiveydelle on myös asetettu erilliset vaatimukset InfraRYL:ssä.

Suomessa alusrakenteet luokitellaan viiteen eri luokkaan (0...4) liikennöintinopeuden mukaan, siten, että luokassa 0 sallittu henkilöliikenteen nopeus on vain 50 km/h, kun taas vastaavasti luokassa 4 nopeus on > 250 km/h. (Ratatekniset ohjeet. Osa 3 2008) Vastaavasti myös ratojen päällysrakenteet jaetaan kuuteen luokkaan muun muassa kisko- ja pölkkytyyppien, tukikerroksen materiaalin sekä sallitun dynaamisen pyöräkuorman perusteella. (Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002)

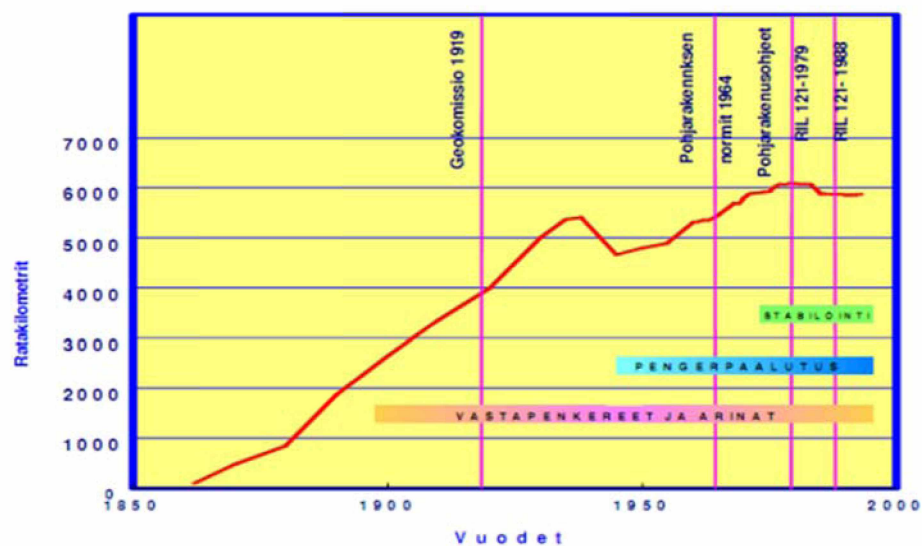
Uuden radan alusrakenteen samoin kuin mahdollisten pohjanvahvistus- ja pohjarakenteiden käyttöikävaatimus on 100 vuotta. Routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta. Radan alus- ja pohjarakenteiden mitoitusperusteet on esitetty Ratateknisten ohjeiden osassa 3. (Ratatekniset ohjeet. Osa 3 2008)

Ratojen luokitteluun on jo tullut muutoksia eurooppalaisten standardien ja yhteentoimivuuden teknisten eritelmien (YTE) käyttöönoton myötä. Liikennevirasto on toteuttanut selvityksen, jonka perusteella rataosat voidaan luokitella uusilla kuorma-kaavioilla laskettujen stabiliteetin varmuuskerrointen mukaan. Selvityksen lopputuotteena tulee olemaan tietokanta, jonka perusteella voidaan tarkastella rataverkon vakavuutta esimerkiksi jonkun yksittäisen rataosan mittakaavassa. Tietokantaa voidaan myös täydentää uusilla tiedoilla. (Mäkelä 2011)

Eurooppalaisessa rataluokittelussa ratarakennetta tarkastellaan kokonaisuutena eli kuormitukset huomioidaan koko ratarakenteen osalta. Tuomisen (2010) selvityksen mukaan nykyisen rataverkon päällysrakenteen laatu ja luokka mahdollistavat suuremmat nopeudet ja akselipainot, mitä alusrakenne ja pohjamaa todellisuudessa kestävät. Eurooppalaiset standardit tuovat mukanaan muun muassa suuremmat mitoituskormat. Tuominen toteaa myös, että nykyisen luokittelumenettelyn ja eurooppalaisen luokittelun keskinäinen vertaaminen on hankalaa, koska luokittelun perusteet ovat erilaiset. (Tuominen 2010)

Suomen rataverkolla olevien alusrakenteiden ikäjakautumaa voidaan arvioida kuvan 38 perusteella. Pääosa alusrakenteista on rakennettu ennen 1940-lukua. Huomattava osa radoista on perustettu pehmeään pohjamaan varaan. Esimerkiksi pehmeiköille perustetut ratapenkereet ovat vuosien myötä painuneet eivätkä näin ollen toimi tehtävänsä mukaisesti (Länsivaara, Lehtonen & Mansikkamäki 2011).

Nykytiedon perusteella alusrakenteen ongelmat voivat johtua liian ohuista routimatomista rakennekerroksista, mikä aiheuttaa routimisongelmia. Alus- ja päällysrakenteen *kuivatuksella* on oma roolinsa routavaurioiden synnyssä. Alusrakenteen vaurioituminen voi johtua myös pohjamaan ongelmista. Myös tukikerroksen jauhautuminen ja suuri vedenpidätyskyky voivat myös aiheuttaa routimisongelmia. (Liikennevirasto 2010c)



Kuva 38. Rakentamisen ohjeistuksen, tekniikan ja ratakilometrien määrän kehitys Suomessa. (Saarinen 2008)

Monin paikoin olemassa olevat radat eivät täytä nykyisiä tai tulevia akselipainon korotuksen tai nopeuden noston asettamia vaatimuksia vakavuuden suhteen. Ratojen stabiliteettia parannetaan yleisimmin vastapenkereillä. Esimerkiksi nykyisin käytössä olevien laskentamenetelmien perusteella mitoitettut vastapenkereet voivat olla tarpeettoman leveitä. Vastapenkereet lisäävät pehmeään pohjamaan kuormitusta entisestään lisäten painumia ja näin ollen kunnossapitotarvetta. Stabiliteettia voidaan parantaa erilaisilla pohjanvahvistusmenetelmillä tai paalulaatalla, myös erilaiset pengerluiska tai radan viereen rakennettavat seinärakenteet tai paalukot ovat vaihtoehtoisia parantamismenetelmiä. Tulevaisuudessa voidaan myös tehdä tarkempia stabiliteettilaskelmia ja osoittaa stabiliteetti riittäväksi. (Länsivaara, Lehtonen & Mansikkamäki 2011)

Käytännössä, jos rata on perustettu oikein, pohjamaa ei ole yleensä rakenteen käyttökärrä rajoittava tekijä. Yleisimpänä ongelmana Suomen rataverkolla ovat pehmeään maahan varaan perustettujen vanhojen rakenteiden painuminen ja stabiliteettiongelmat. Pohjamaan vaurioitumismekanismit liittyvät ensisijaisesti pehmeillä (savi ja turve) tapahtuvaan kasvavan kuormituksen aiheuttamiin painumiin ja stabiliteettiongelmiin.

Alusrakenteeseen kuuluvien eristys- ja välikerroksen materiaalien valinnasta ja optimoinnista sekä routimisherkkyydestä on tehty tutkimusta (Nurmikolu 2005), jonka perusteella on laadittu nykyiset materiaalivaatimukset uusille rakennettaville radoille.

Uusien eristys- ja välikerrosten materiaalien ja rakentamisen laadunvalvonnassa olisi tutkimusten mukaan tulevaisuudessa siirryttävä kuormituskestävyyden mittaamiseen perustuviin menetelmiin. Menetelmiin siirtyminen vaatii kuitenkin vielä lisätutkimuksia ennen kuin perinteisestä tiiveyteen perustuvasta laadunvalvonnasta voidaan kokonaan luopua. Kantavuuden kannalta myös nykyisin käytössä olevia lähinnä routimisherkkyyteen ja hienonemiseen perustuvia rakeisuusvaatimuksia on syytä tarkastella vielä kriittisesti. (Kalliainen et al. 2011) Nykyisten eristys- ja välikerroksen materiaalivaatimusten mukaisesti rakennettuja rataosia on hyvin vähän, joten kokemuksiin perustuvia elinkaaritarkasteluja ei niiden osalta ole vielä edes voitu tehdä.

Tuomisen (2004) mukaan radan alus- ja pohjarakenteiden vahvistustarpeen kustannukset olivat tuohon aikaan noin 70 000 €/km, kun vahvistamiseen käytetään penkereiden leventämistä. Ellei penkereitä levennetä, kustannukset olivat keskimäärin 50 000 €/km. Paalulaatan kustannukset olivat Tuomisen (2004) mukaan noin 3000-4000 €/rd-m.

Alusrakenteen vaurioitumismekanismit voidaan jakaa itse alusrakenteesta johtuviin, ratarakenteen muista komponenteista tai ulkoisista syistä johtuviin prosesseihin. Toisaalta alusrakenteen vauriot vaikuttavat myös ratarakenteiden muiden komponenttien vaurioitumiseen. Alusrakenteen materiaalien laatu ja mahdollinen ajan kuluessa tapahtuva hienontuminen voivat mahdollistaa routimista vedenläpäisevyyden heikentyessä. Kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset, kuten ratapenkereen leviäminen ja painuminen ajan myötä lisäävät päällysrakenteen kunnossapitotarvetta. Myös kasvillisuus ja ilmasto vaikuttavat vaurioitumismekanismeihin. Ratarakenteen jäykkyyden epäjatkuvuuskohdat, kuten sillat tai kallioleikkaukset, lisäävät kunnossapidon tarvetta. Alusrakenteen vaurioitumismekanismeja on luokiteltu muun muassa Hyslipin (2007) julkaisussa seuraavasti: kuivatuksen ongelmat, raidesepelin hienontuminen, alusrakenteen stabiliteetin heikentyminen ja muodonmuutokset, alusrakenteen materiaalien hienontuminen, radan epätasaisesta kunnosta johtuvat vauriot sekä siirtymärakenteiden vauriot. (Hyslip 2007)

Alusrakenteen käyttöikä on pitkä ja sillä on suuri vaikutus muiden rakenneosien toimintaan. Suoraan alusrakenteeseen kohdentuvia kunnossapitotoimenpiteitä ovat kuivatuksen parantamiseen ja kasvillisuuden poistoon liittyvät tehtävät. Jos ratarakenteen vaurioituminen johtuu alusrakenteesta, useimmiten joudutaan hoitamaan päällysrakenteessa näkyviä oireita eikä varsinaista vaurion syytä. Alusrakenteen kunnan tai vaurioiden mittaamiseen ei ole vielä Suomessa rutiinikäytössä suoria menetelmiä, mutta esimerkiksi ratarakenteen jäykkyyden mittaamisen ja mallintamismenetelmien kehittyessä on mahdollista laskea tarkemmin myös erilaisten korjaamistoimenpiteiden kustannusvaikutuksia.

Kahden viime talven aikana Suomessa on ollut runsaasti routimisen ja talviolosuhteiden aiheuttamia liikenneongelmia. Ratarakenteeseen liittyvänä suurimpana ongelmana on ollut routavaurioiden aiheuttamat nopeusrajoitukset ja viivytykset. Routavaurioiden aiheuttavien nopeusrajoitusten määrä oli talvella 2009-2010 suurimmillaan 976 km ja talvella 2010-2011 noin 780 km. Ongelma näyttää kuitenkin ensisijaisesti liittyvän sääolosuhteisiin, koska talvella 2009 routarajoituksia oli vain yhden kilometrin matkalla. Alustavien laskelmien mukaan talvella 2010 esiintyneiden toistuvien routavaurioiden (140 km) korjaamisen investointikustannukset olisivat noin 40 M€. Jos koko rataverkko korjattaisiin kerran 10 vuodessa esiintyvän pakkasmäärän varalle, kustannukset olisivat kymmenkertaiset. Routavaurioiden syyt voidaan karkeasti jakaa kolmeen luokkaan ilmastotekijöihin, ratarakenteiden materiaaleista johtuviin ja ratojen rakenteellisten epäjatkuvuuskohtien aiheuttamiin vaurioihin. Näistä suurimmaksi routavaurioiden aiheuttajaksi on arvioitu materiaaliongelmat, joista noin puolet liittyy tukikerroksen jauhautumiseen. (Liikennevirasto 2010d, Liikennevirasto 2010c)

Alus- ja pohjarakenteen kunnolla on merkittävä rooli muiden rakenneosien elinkaaren kannalta. Esimerkiksi epätasaisien painumien aiheuttamat kisko- tai pölkkyyvät tai nopeusrajoitukset aiheuttavat merkittäviä kunnossapito- tai viivytyksekustannuksia vuodesta toiseen ja lyhentävät myös muiden rakenneosien elinkaarta.

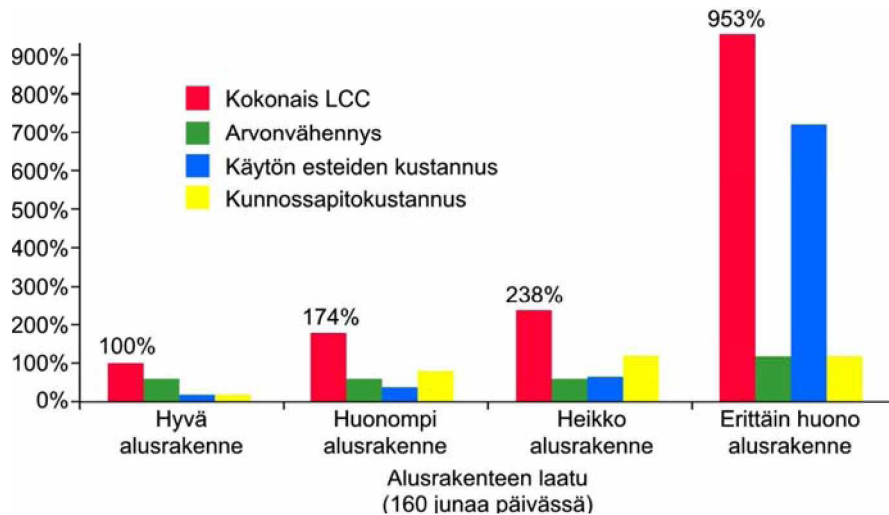
6.1.2 Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista

Kansainvälisessä kirjallisuudessa alus- ja pohjarakenteista voidaan käyttää termiä substructure. Substructure-termissä on usein mukana myös tukikerros. Kirjallisuudessa esitetyt laskelmat ja menetelmät eivät ole välttämättä suoraan sovellettavissa suomalaisille alusrakenteille.

Elinkaarikustannuslaskenta soveltuu esimerkiksi erilaisten perustamistapojen vertailuun. Alus- ja pohjarakenteiden kunnossapito on pääasiassa rakenteiden kuivatukseen liittyvää ja mahdollista penkereen muodon korjausta. Alus- ja pohjarakenteen vaurioituminen voi kuitenkin nostaa päällysrakenteen kunnossapitokustannuksia huomattavasti. Esimerkiksi routavaurioiden aiheuttamien kunnossapito- ja viivytyskustannusten sekä korjaamiseen tarvittavien investointien hyöty/kustannussuhde laskelman avulla voidaan optimoida tulevia korjauksia.

Ruotsissa tehtiin elinkaarilaskentaa sovellettaessa kalkkistabilointitekniikkaa olemassa olevan radan pohjamaan vahvistamiseen siten, että rataa ei kaivettu auki eikä liikenteelle aiheutunut häiriötä. Elinkaarilaskennan vertailuvaihtoehtona käytettiin menetelmää, jossa koko ratarakenne ja pehmeä pohjamaa olisi kaivettu pois eli suoritettu massanvaihto. Täydellisen elinkaarianalyysin hyödyntäminen olisi edellyttänyt myös referenssivaihtoehdon määrittelyn tapauksena, jossa ei olisi tehty mitään investointeja vaan olisi vain kunnossapidetty olemassa olevaa rataosaa, tästä aiheutuneet kustannukset ja mahdolliset liikennehaitat huomioiden. Laskennan tulokset osoittivat kuitenkin, että pilaristabiloinnin käyttö oli edullista. Varsinaisen stabiloinnin osuus koko hankkeen kustannuksista oli vain 16 %. Lisäksi liikennehaitasta ei syntynyt kustannuksia. Molemmissa vaihtoehdoissa jatkossa syntyvien kunnossapitokustannusten oletettiin olevan samaa tasoa. (Innotrack Deliverable D1.4.8 2009).

Itävallassa tehdyn tutkimuksen mukaan radan alus- ja pohjarakenteen laadulla on suuri vaikutus kunnossapitokustannuksiin sekä liikennehaitan aiheuttamiin kustannuksiin. Kuvassa 39 on esitetty laskennan tulokset. Kuvasta voidaan havaita, että erityäin huonon alusrakenteen aiheuttamat haitat liikenteelle muodostavat huomattavan osan elinkaarikustannuksista. Sen sijaan erilaisten rakenteiden kunnossapitokustannuksissa ei näissä laskelmissa ole suuriakaan eroja. Laskelmien mukaan sisäinen korkokanta alusrakenteen laadun parantamiselle on ratalinjalla 35 % ja vaihteissa jopa 40 %. (Veit, Marschnig 2011)



Kuva 39. Huonon alusrakenteen vaikutukset kunnossapitokustannuksiin sekä liikennehaitan aiheuttamiin kustannuksiin. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Veit, Marschnig 2011).

Ratarakenteen kokonaisjäykkyys on eräs parametri, jota on käytetty muuttujana australialaisten kehittämässä mekanistisessa ITDM-elinkaarimallissa. (Crawford, Murray & Powell 2001) Mallia on kuvattu yksityiskohtaisemmin luvussa 4. Jäykkyys kuvaa koko ratarakennetta ja siihen vaikuttavat luonnollisesti sekä päällysrakenne että pohjamaa ja alusrakenne. Australialaisten mallin soveltaminen suoraan on hankalaa sen vuoksi, että siellä ei ole käytössä vastaavanlaisia alusrakenteita kuin Suomessa. Jäykkyys on tärkeä parametri, jonka avulla voidaan arvioida kunnan kehittymistä ja tarvittaessa kohdentaa kunnossapitotoimenpiteet heti oikeaan asiaan (taulukko 15). Elinkearikkustannuslaskennan ja esimerkiksi radan kunnossapidon kustannustehokkuuden kannalta on tärkeätä, että löydetään selkeästi mitattava alusrakenteen ominaisuuksia ja niiden vaihtelua kuvaava parametri. (Berggren 2009)

Taulukko 15. Jäykkyyden, radan vaurioiden ja kunnossapidon välinen riippuvuus. Taulukko on käännetty suomeksi julkaisusta (Berggren 2009).

Havainto	Ongelma	Kunnossapito/korjaus
Pieni radan jäykkyys	Heikko pohjamaa tai hienontunut sepeli	Alusrakenteen kuormituskestävyyssmitoitus, pohjamaan stabilointi
Vaihteleva radan jäykkyys	Jäykkyyden äkilliset muutokset	Välilevyjen yhteensovittaminen, alusrakenteen kuormituskestävyyssmitoitus, sepelinalusmatto
Pölkyn alla oleva tyhjätila	Hienontunut sepeli, paikallinen painuma, huonot kiskon kiinnitykset	Kiskon kiinnitysten tarkastaminen, tukeminen, stoneblowing, sepelin puhdistus

Berggrenin mittausmenetelmällä voitiin erotella eri aallonpituudet, jotka kuvaavat radan alusrakenteiden ja päällysrakenteen aiheuttamia ongelmia. Toisin sanoen mitauksilla voitiin tarkemmin löytää se kohde, johon kunnossapitotoimenpiteet pitää kohdentaa. (Berggren 2009) Taulukossa 15 on esitetty eräs tapa luokitella jäykkyysmittauksilla saatavan tiedon merkitystä erilaisten kunnossapitotoimenpiteiden kohdentamisessa.

Eräänä merkittävänä tekijänä esimerkiksi alusrakenteiden kunnon kehittymisen funktion kehittämisessä on ratarakenteesta esimerkiksi maatutkalla mitattavan informaation hyödyntäminen yhdistettynä raidegeometrian mittauksista saatavaan tietoon. Kirjallisuudesta löytyy useita esimerkkejä maatutkatekniikan hyödyntämisestä. (Sussmann, Selig & Hyslip 2003; Anbazhagan et al. 2011; Passi 2007; Silvast et al 2010; Loizos, Silvast & Dimitrellou 2007)

6.2 Tukikerros

6.2.1 Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit

Tukikerroksen tehtävä on tukea raidetta sivu- ja pystysuunnassa sekä pitää raide geometrisesti oikeassa asennossa ja asemassa. Tukikerros jakaa liikennekuormituksen alusrakenteille ja muodostaa pölkyille ja kiskoille kantavan alustan. Tukikerroksen mitat määräytyvät sallitun nopeuden, kiskonpituuden, tukikerrosmateriaalin ja pölkkytyypin perusteella. Betoniratapölkkyjä käytettäessä tukikerroksen paksuus on 550 mm, puuratapölkkyjä käytettäessä tukikerroksen paksuun on 450 mm. (Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002)

Tukikerroksen materiaalina käytetään useimmiten kalliosta murskattua raidesepeliä, vähäliikenteisillä radoilla tai ratapihoilla voidaan käyttää raidesoraa. Raidesepelin raekoko on 32/63 mm ja se luokitellaan eri lujuusluokkiin ensisijaisesti kiviaineksen iskunkestävyyden perusteella (Los Angeles-testi). Raidesepelin hiovan kulutuksen kestävyydelle on myös oma kriteerinsä, testausmenetelmänä käytetään micro-Deval testiä. Raidesepelin laatuvaatimukset on esitetty SFS-EN 13450 kansallisessa soveltamisstandardissa SFS 7007. (SFS 7007, 2007)

Suomessa raidesepelin laatuvaatimukset määräytyvät radan liikennemäärän mukaan. Raidesepelin laatuluokan valitsemiseksi on kehitetty malli, jossa voidaan huomioida huonompaa lujuusluokkaa olevan raidesepelin aiheuttamat hankintakustannussäästöt ja toisaalta myös aikaisempi uusimistarve. Pääradoilla käytettävälle raidesepelille asetetut lujuusvaatimukset ovat erittäin tiukat, joten kustannuksia voi olla tarpeen tapauskohtaisesti optimoida, koska lujuudeltaan riittävän hyvän kiviaineksen saatavuudessa on alueellista vaihtelua. Myös muiden ominaisuuksiensa (rakeisuus ja muoto) suhteen raidesepeli on kiviainekseksi erittäin tarkasti määritelty tuote.

Lujuusominaisuuksiltaan vaativimman raidesepelin laskennallisesti käyttöäksi on määritelty vähintään 350 Mbrt. Käyttöiän päättymisen tarkoittaa siis käytännössä, sitä että sepeli on jauhautunut niin hienoksi, että se on joko puhdistettava tai vaihdettava uuteen. Suomen rataverkon eri osiin kohdistuu erilainen liikennekuormitus. Raidesepelin laatu määräytyy vuotuisen liikennemäärän mukaan siten, että lujuusominaisuuksiltaan parasta raidesepeliä käytetään rataosilla, joiden liikennemäärä on ≥ 9 Mbrt. Vastaavasti lujuusominaisuuksiltaan heikointa sepeliä käytetään rataosilla, joiden liikennemäärä on ≤ 3 Mbrt. (Nurmikolu 2000)

Raidesepelin käyttöikään vaikuttavat sepelin valmistuksessa käytetyn kiven lujuusominaisuudet, muoto ja rakeisuus sekä luonnollisesti liikenteen aiheuttama kuormitus sekä koko ratarakenteen muiden osien ominaisuudet ja kunto. Raidesepeli jauhautuu liikennekuormituksen alla pikkuhiljaa hienommaksi ja hienontumisen vaikutukset ovat tukikerroksen toiminnalle aina negatiivisia. Hienontuminen aiheuttaa muun muassa sepelikerroksen vedenläpäisevyyden pienenemistä ja routimista sekä muutoksia radan geometriassa. Geometriamuutokset ja muut haitat lisäävät luonnollisesti kunnossapitokustannuksia. Tukikerroksen vaurioitumismekanismeja on tutkittu sekä raidesepelin laadun että tukikerroksen rakenteellisen toiminnan kannalta. Tukikerroksen vaurioituminen vaikuttaa myös muiden rakenneosien käyttöikään, esimerkiksi betonipölkkyt voivat murtua pölkyn alle syntyvän tyhjätilan aiheuttaman dynaamisen vaimennuksen heikentymisen vuoksi. (Nurmikolu et al. 2010, Nurmikolu 2006)

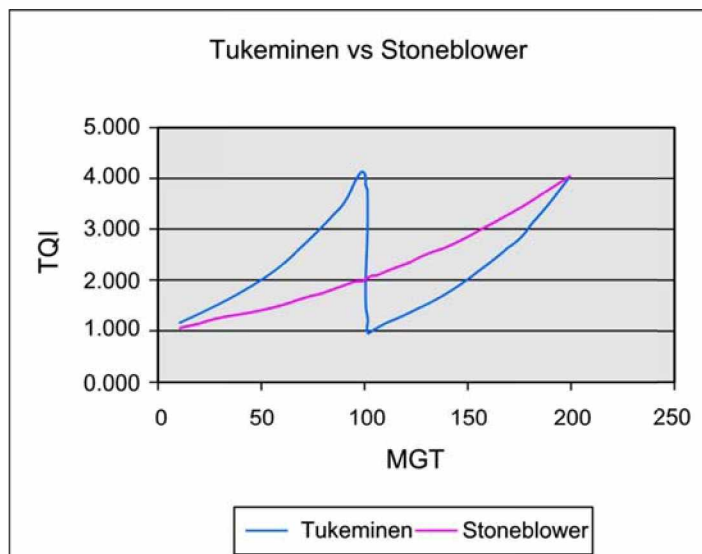
Sepelin puhdistuksen ja mahdollisen vaihdon arviointi voidaan toteuttaa niin kutsutun rakeisuuslukututkimuksen avulla. Toisin sanoen sepelikerroksesta otettujen näytteiden raekokojakautuma määrittämällä voidaan todeta hienontuneisuuden aste. Raidesepelin laatua voidaan tutkia myös maatutkalla ja näin ollen kunnossapitotoimenpiteiden kohdentaminen on mahdollista entistä tarkemmin ja taloudellisemmin. Maatutkamittausten on todettu korreloivan erittäin hyvin rakeisuuslukututkimuksen kanssa. Tulevaisuudessa yhdistämällä maatutka- ja geometriamittausten tiedot on mahdollista toteuttaa elinkaarikustannuslaskelmia sepelin puhdistusrajan ja muiden kunnossapitotoimenpiteiden optimoimiseksi. (Silvast et al. 2010, Passi 2007)

6.2.2 Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista

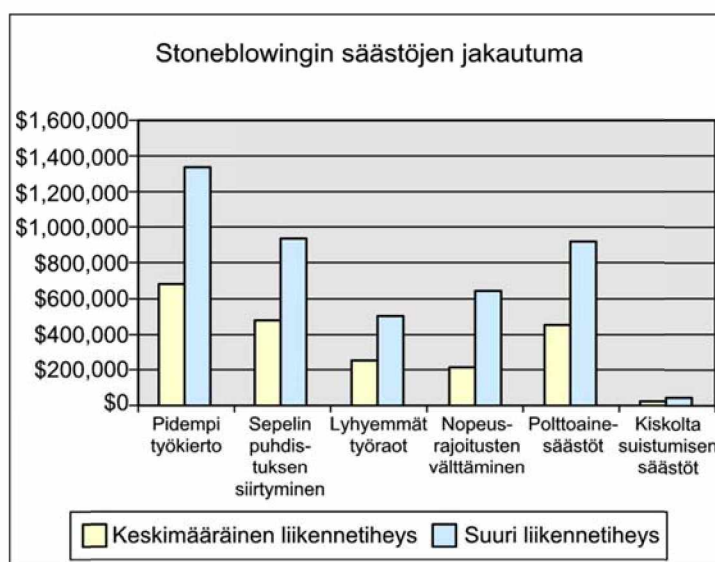
Tukikerroksen elinkaaritaloudellisuustarkastelut liittyvät sepelimateriaalin laatukriteereihin, tukikerroksen kunnossapitoon sekä muiden rakenneosien ja tukikerrosmaateriaalin vuorovaikutuksen arviointiin. Tukikerroksen vaurioitumisen mittarina käytetään useimmiten raiteen geometriamittauksissa todettuja poikkeamia.

Tukikerroksen kunnossapitotoimenpiteistä tärkein on tukeminen, jonka avulla raide saatetaan takaisin oikeaan geometriseen asemaan. Järeämpänä kunnossapitotoimenpiteenä sepelikerros voidaan myös puhdistaa ja siihen voidaan puhdistuksen yhteydessä lisätä täydennyssepeleä. Tukemistoimenpiteiden tehokkuutta on arvioitu useissa tutkimuksissa. Sepelin hienontuessa tukemisen tehokkuus pienenee ajan myötä. On myös esitetty tutkimustuloksia, joiden mukaan tukeminen vastaa hienontumista ajatellen noin 20 Mbrt liikenteen lisäkuormitusta. Tukemisen aiheuttamaa sepelin vaurioitumista on myös mitattu syntyvän hienoaineksen määrällä. (Esveld 2001)

Perinteisen tukemisen sijaan on käytetty stoneblowing -menetelmää, jossa raidesepeliin kohdistuva mekaaninen kulutus on pienempää kuin perinteisessä tukemismenetelmässä. Stoneblowing -menetelmän käyttö pienentää raiteen geometrian korjaamiseen tarvittavaa kunnossapittoa huomattavasti (kuva 40). Tukemisessa syntyy hienoainesta huomattavasti enemmän kuin stoneblowing -menetelmässä. (Esveld 2001) (Zarembski, Newman 2008)



Kuva 40. Stoneblowing menetelmän ja perinteisen tukemisen vaikutus radan taksaisuusindeksiin (TQI). Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Zarembski, Newman 2008).



Kuva 41. Stoneblowingin aikaansaamat kustannussäästöt: keskimääräisellä ja tiheällä liikennemäärällä, Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta. (Zarembski, Newman 2008).

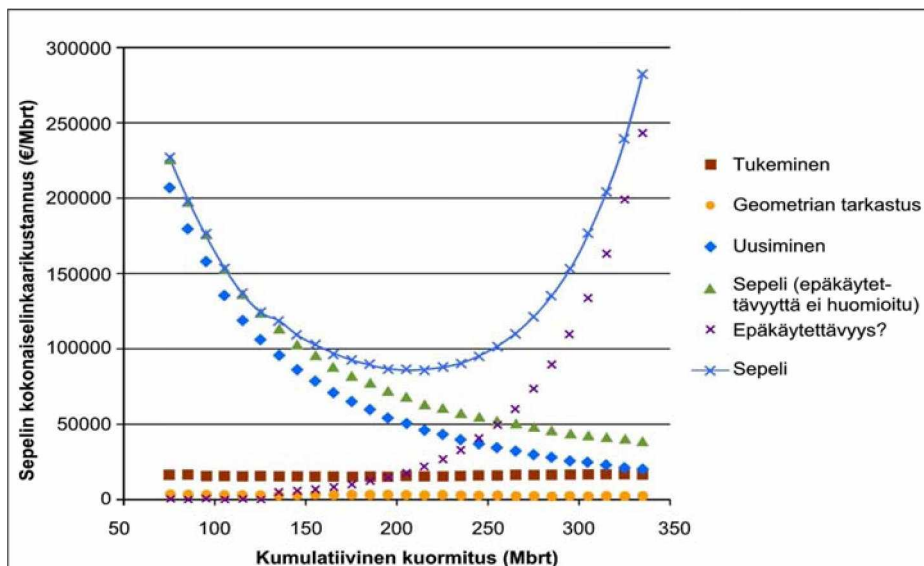
Stoneblowing menetelmällä saavutetut säästöt olivat Zarembskin tutkimuksessa kokonaisuudessaan 2,6 milj. USD/vuodessa tiheästi liikennöidyllä radalla. Säästöt syntyivät kunnossapitotarpeen vähentymisestä, sepelin vaurioitumisnopeuden hidastumisesta ja viivytysten vähentymisestä (kuva 41). Herkkyystarkastelun perusteella Network Railin säästöt olivat jopa 5 milj. USD/vuodessa tiheästi liikennöidyllä rataosalla ja 1,4 milj. USD/vuodessa keskimääräisesti liikennöidyllä rataosalla. Esimerkilaskelmat on tehty käyttäen keskimääräistä Network Railin vuosittaista tukemismäärää, joka on noin 350 mailia. (Zarembski, Newman 2008)

Sepelin puhdistuksen vaikutuksesta raidesepelin ominaisuuksiin on tehty Suomessa kokeellista tutkimusta. Tutkimuksen johtopäätöksiä on todettu muun muassa,

että sepelin tukeminen löyhentää tukikerrosta ja hienontaa sepeliä, mikä johtaa tukikerroksen tiivistymiseen nopeasti tukemisen jälkeen. Näin ollen tukemistoimenpiteet muuttuvat ajan myötä käytännössä tehottomiksi. Täydennysepelin lujuus ei vaikuta alkuperäisen kiviaineksen jauhautumiseen. Lujuusominaisuuksiltaan parempi raideseperi ei siis hienonna vanhaa sepeliä yhtään enempää kuin lujuudeltaan heikompi sepeli. Sepelin puhdistusaika tulisi optimoida geometria- ja kunnossapitotietojen, tukikerrosmateriaalin kunnan sekä muodostuvien kunnossapitotoimenpiteiden ja materiaalikustannusten suhteen. (Nurmikolu, Kolisoja 2010)

Portugalissa tehdyssä opinnäytetyössä kehitettiin tukikerrokselle vaurioitumismalli, jonka lähtökohtana on raiteen geometriasuureiden mittaaminen. Mittaustuloksia on käsitelty regressioanalyysillä ja lopputuloksena on saatu lineaarinen malli ($\sigma = c_1 + c_0 \cdot T$), jossa laskentaparametreina ovat radan korkeuspoikkeamien keskihajonta (σ), raiteen asema joko sepelin uusimisen tai tukemisen jälkeen (c_1), liikennemäärä tonneina (T) ja suoran kulmakerroin, joka kuvaa vaurioitumisnopeutta (c_0). Yhtälön parametreista c_1 ja c_0 ovat satunnaismuuttujia, joille on määritetty todennäköisyysjakautuma, ja joiden oletetaan olevan toisistaan riippumattomia. (Andrade 2008)

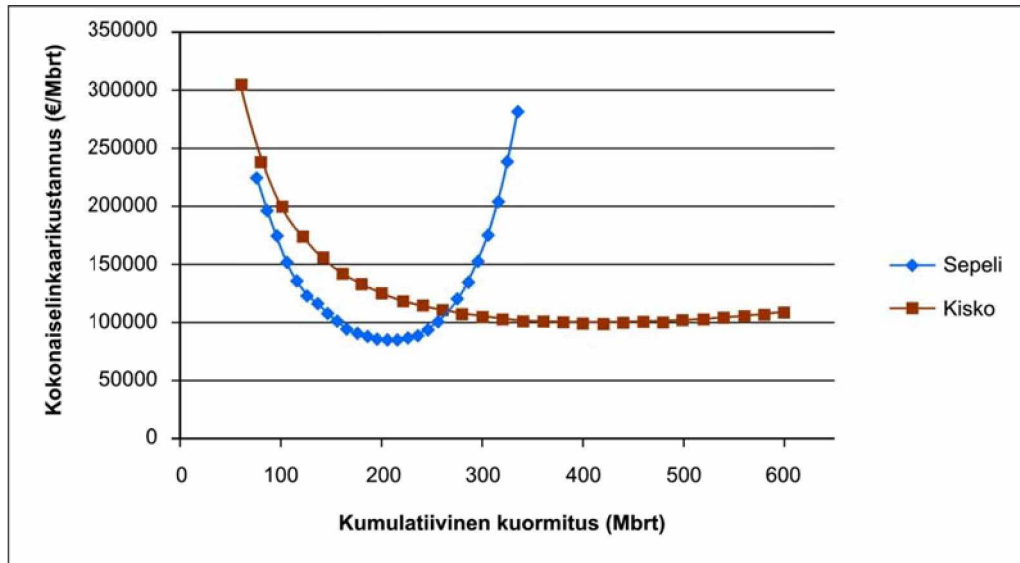
Andraden (2008) tutkimuksessa toteutettiin Monte Carlo simulaatio teoreettiselle 100 km pituiselle rataosalle, joka oli jaettu 200 m pitkiin kunnossapitotaksoihin. Laskennan lopputuloksena saatiin raideseperin elinkaarikustannukset suhteessa liikennemäärään (Kuva 42). (Andrade 2008) Kehittyyn malliin on liitetty myös eksponentiaalisesti laskettu epäkäytettävyyden (unavailability) kustannus, jossa muuttujana on se kumulatiivinen liikennemäärä, jonka rataosa kestää ennen sepelin uusimista. Eri-laisia vaihtoehtoja analysointiin 25 kappaletta. Elinkaarikustannuksiltaan edullisim-maksi osoittautui vaihtoehto, jossa sepeli uusittiin 195 Mbrt jälkeen. Työssä on myös yhdistetty sepelin elinkaarimalliin kiskojen vastaava malli (kuva 43). (Andrade 2008)



Kuva 42. Tukikerroksen elinkaarikustannukset käyttöiän (Mbrt) suhteen 100 km pituisella suoralla esimerkki rataosalla. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta. (Andrade 2008).

Kuvasta 42 voidaan havaita, että radan epäkäytettävyys eli kunnossapitotoimenpiteet ja esimerkiksi huonosta kunnosta johtuvat nopeusrajoitukset lisäävät sepelin elinkaari-

rikustannuksia merkittävästi, kun käyttöikä ylittää 200 Mbrt:a. Tutkimuksen tekijän näkemyksen mukaan epäkäytettävyyskustannuksia pitää kuitenkin vielä analysoida lisää, ennen kuin tuloksista voidaan tehdä tarkempia johtopäätöksiä. Kuvien 42 ja 43 tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että laskelmat on tehty teoreettisella rataosalla ja tavoitteena on ollut osoittaa, että laskennallisella mallilla ja simuloinnilla voidaan löytää optimoitu sekä sepelin että kiskojen uusimisväli. Tarkastelu on myös esimerkki siitä kuinka RAMS-parametrejä käytetään optimoinnissa, tulokset tosin osoittavan parametreissa olevan vielä kehitettävää.



Kuva 43. Sepelin ja kiskon elinkaarikustannukset 100 km pituisella suoralla esimerkki rataosalla. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Andrade 2008).

6.3 Ratapölkkyt

6.3.1 Rakenneseosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit

Ratapölkkyjen tehtävänä on ottaa vastaan ja siirtää kiskoilta tuleva kuormitus tukikerrokseen ja edelleen muuhun ratapenkereeseen ja pohjamaahan. Ratapölkkyt toimivat myös kiskojen kiinnitysalustana muodostaen mahdollisimman tasalaatuisen alustan kiskoille. Ratapölkkyt ja kiskon kiinnitykset tukevat kiskoa sekä poikittais- että pituussuunnassa ja niiden avulla raideleveys säilyy vakiona. Suomessa käytetään esijännitettä betonaratapölkkyjä, mutta myös puusta valmistettuja ratapölkkyjä on käytössä erityisesti vähemmän liikennöidyillä rataosilla ja ratapihoilla. Suomen rataverkolla betonaratapölkkyjen osuus on noin 70 %. Ratapölkkyjä on pääraiteilla 1633-1650 kappaletta/km, vähäliikenteisillä radoilla pölkkyjen määrä voi olla 1265-1280 kpl/km. (Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002, Liikennevirasto 2011b)

Ratapölkkyjen laatu varmistetaan betonitehtaalla betonaratapölkkyjen teknisten toimitusohjeiden mukaisesti. Laadunvarmistus koskee valmistuksessa käytettäviä raaka-aineita, betonia ja teräksiä, sekä valmiita ratapölkkyjä niiden staattisen ja dynaamisen kuormituskestävyyden osalta. Vuoden 1982 jälkeen asennettujen betonaratapölkkyjen käyttöikätaavoite on 40 vuotta ja aikaisemmin asennettujen betonipölkkyjen

käyttöikätaavoite vastaavasti 30 vuotta. (Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002) Vuosien 2006-2009 aikana on hankittu vuosittain 220 000...280 000 betonista ratapölkkyä, vastaava puuratapölkkyjen määrä oli 120 000...180 000 kappaletta. Karkeasti arvioiden hankittu pölkky määrä kului alle 300 raidekilometrin uusimiseen. Pölkkyä vaihdetaan kunnossapitotöiden yhteydessä normaaliin kunnossapitosopimukseen kuuluvana työnä. Jos rataosan vaihdettavien pölkkyjen määrä on suurempi kuin 2 % kokonaispölkky määrästä, työ tilataan erillisenä työnä. (Liikennevirasto 2010a)

Rantalan tutkimuksen mukaan Suomen rataverkolla käytössä olevat ja osittain jopa käytöstä eri syistä poistetut ratapölkkyt ovat lujuudeltaan kriteerit täyttäviä, mikä mahdollistaa periaatteessa arvioidun käyttöiän pidentämisen. Käyttöikään vaikuttavien tekijöiden tarkka selvittäminen on kuitenkin erittäin merkittävä tekijä, jotta käyttöikä laskelmia voidaan tehdä. Käyttöiän ennustamisen olisi perustuttava liikennekuormitukseen ja mahdollisesti joihinkin in-situ menetelmillä mitattaviin joko pölkyn tai muiden rakenneosien ominaisuuksiin. Todennäköisesti erilaisilla rataosilla käyttöikä on kuormituksesta riippuen erilainen, joten pelkästään yhden käyttöikä arvon antaminen on mahdotonta. (Rantala 2011)

Betoniratapölkkyt vaurioituvat pääasiassa liikenteen aiheuttamien suurten iskukuormien vuoksi. Tällaiset suuret kuormat aiheutuvat yleisimmin kisko- ja kalustovioista. Tukikerroksen pölkylle tarjotun tuennan puutteellisuus on toinen merkittävimmistä vaurioiden aiheuttajista. Betonipölkyn rapautuminen ympäristökuormituksesta johtuen on kolmas päävauriotyyppi. (Rantala 2011)

6.3.2 Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista

Ratapölkkyjen elinkaaritarkastelut liittyvät useimmiten pölkkyjen käyttöikään ja käyttöiän määrittelyyn pölkkyjen uusimistiheyteen. Useissa tutkimuksissa ratapölkkyjen vaurioitumisesta johtuva kunnossapito luokitellaan ennakoituun pölkkyjen vaihtoon ja esimerkiksi onnettomuuksien tai muiden vaurioiden aiheuttamiin ennakoimattomiin pölkyn vaihtoihin.

Ratapölkyn kunnon kehittymisen mekanistisen mallin lähtötiedoiksi tarvitaan huomattava määrä mitattua tietoa tarkasteltavalta rataosalta ja luonnollisesti tiedot käytettyjen pölkkyjen mekaanisista ominaisuuksista. Seuraavassa on esitetty esimerkki tarvittavista tiedoista. (Schmid et al. 2010)

- Säröön johtava jännitys
- Jousittamaton massa
- Säröstä seuraavaan pölkyn vaurioitumiseen tarvittava syklimäärä
- Akselipaino
- Pölkyn ominaisuudet (dimensiot, Youngin moduuli)
- Pölkyn alustan jäykkyyttä kuvaava moduli
- Kaarresäde
- Kiskon kallistus
- Kiskon poikkileikkaus
- Raideleveys
- Kaluston nopeus

Osa luettelossa esitetyistä muuttujista on vakiota ja osa ei, käytännössä tiedot on luokiteltava jokaiselle rataverkon homogeeniselle osalle erikseen. Mekanistisia malleja kehitettäessä kaikki mahdolliset vaurioitumismekanismit olisi huomioitava, esi-

merkiksi pölkyn tapauksessa kiskonkiinnitysten pettämisen aiheuttama vaurioituminen olisi otettava huomioon. Esimerkistä puuttuvat esimerkiksi raiteisiin tulevat vaakavoimat, vaikka ne voivat joissakin tapauksissa olla yksi pölkyn taivutusmomenttiin vaikuttava tekijä.

Toinen tapa kehittää pölkyn vaurioitumisen mekanistista mallia on hyödyntää käytön aikaisista vaurioista saatavaa tietoa. Ratapölkyn tapauksessa tietokannassa pitäisi olla kaikki rataverkolla olevat pölkkyvauriot sekä vastaava liikennemäärätieto. Olemassa oleva tieto sovitetaan yhtälöön esimerkiksi $N_s = k \cdot M_{brt}^\alpha$, jossa N_s on pölkkyvaurioiden määrä ja kertoimet k ja α ovat käyräsovituksesta tulevia kertoimia. Tällaisia yhtälöitä voidaan tuottaa rataverkon eri osista. Tämä on melko yksinkertainen tapa ja se kuvaa vain niitä olosuhteita, joista mittaustieto on tuotettu. Menettelyä voidaan monipuolistaa esimerkiksi käyttämällä akselipainoa ja akselien lukumäärää bruttonnien sijasta. (Schmid et al. 2010)

Murray (2010) on artikkelissaan kuvannut Monte Carlo simulaation käyttöä betonisten ratapölkkyjen elinkaaren laskennassa. Tutkimuksen johtopäätöksenä on muun muassa todettu, että melko pieni lisäys akselipainossa (7 %) lyhentää simuloinnilla saatua käyttöikää 70 vuodesta 35 vuoteen sekä johtaa tarpeeseen vaihtaa kaikki pölkkyt 35 vuoden jälkeisen 20 vuoden aikana. (Murray 2010)

Li ja Huang ovat artikkelissaan kuvanneet Markovin ketjun käyttöä ratapölkkyjen käyttöiän mallintamisessa ja sitä kautta saatuja kunnossapitokustannusten säästöjä. Artikkelissa esitetään kaksi vaurioitumiskriteeriä ja esitetään pölkkyjen toimintavarmuusmalli. Kunnossapitokustannusten säästöt syntyvät ensisijaisesti siitä, että pölkkyjen vaihdot pystytään ennakoimaan paremmin odottamattomien liikennehaittaa aiheuttavien pölkkyjen vaihtojen sijaan. (Li, Huang 2008)

Yun ja Ferreira ovat tutkimuksessaan simuloineet puisten ratapölkkyjen vaihtoaikojen optimointia. Lähtökohtana on neljä erilaista pölkkyjen vaihdon skenaariota. Pölkkyjen vaurioitumisaikaa on mallinnettu Weibull -jakautumalla, jota varioidaan kahdella muuttujalla. Mallia on testattu 1000 pölkyn oletusrataosalla 20 vuoden oletetulla käyttöiällä. Simuloinnin tuloksena on saatu edullisimmaksi vaihtoehdoksi tapaus, jossa pölkkyjen vaihtoa viivytetään siihen ajankohtaan saakka kunnes 10 % pölkkyistä on vaurioitunut ja sen jälkeen vaihdetaan kaikki vaurioituneet pölkkyt. Kehitetty prosessi on muunneltavissa erilaisille skenaarioille. (Yun, Ferreira 2003)

Leong ja Murray ovat tutkineet pölkkyjen vaurioitumiseen vaikuttavia iskuvoimia todennäköisyyslaskennan keinoin maksimivoimaan perustuvan konservatiivisen menetelyn sijaan. Menetelmällä pystyttiin laskemaan pölkkyjen käyttöikään vaikuttavan kumulatiivisen kuormituksen ja ylisuurten vaurioita aiheuttavien kuormitusten esiintymistiheys. Tulosten käsittelyssä on käytetty Monte Carlo -simulaatiota siten, että muuttujina olivat se ajanhetki, jolloin ensimmäinen suuri kuormitus esiintyy ja se pölkky, jonka kohdalle kuormitus osui. Esimerkki simuloinnin tuloksista on esitetty taulukossa 16, jossa kuvataan dynaamisen kuormituksen aiheuttamien pölkkyvaurioiden esiintymistä 50 vuoden aikana. Tuloksia voidaan hyödyntää siten että, mitoittavaa voimaa valittaessa hyväksytään tietty määrä vaurioituneita pölkkyjä. Mitoituksen lähtökohdaksi voidaan myös asettaa kerran 200 vuodessa tapahtuva vaurio. Tällöin pölkkyjen mitoittava voima valitaan suuremmaksi, ja vain muutama prosentti pölkkyistä vaurioituu 50 vuoden aikana. Laskennassa ei oteta huomioon staattista kuormaa. (Leong, Murray 2008)

Taulukko 16. Esimerkki pölkkyvaurioiden esiintymistä erilaisilla kuormituksilla, tulokset on laskettu Monte Carlo -simuloinnilla. Taulukko on käännetty suomeksi julkaisusta (Leong, Murray 2008).

Dynaaminen iskuvoimalisä (kN)	Kokonais voima (kN)	Tapahtumia 50 vuoden aikana (kpl)	Vaurioituneiden pölkkyjen kumulatiivinen määrä suhteessa tapahtumien määrään (%)
230	370	1500	0
295	435	100	1
400	540	1	100

Pohjainten käyttöä betonisten ratapölkkyjen ja myös tukikerroksen käyttöä lisäävänä tekijänä on tutkittu muun muassa Itävallassa ja Saksassa sekä laajassa UIC:n tutkimushankkeessa (13 maan edustettuna). UIC:n hankkeessa tehtiin muun muassa mittauksia Sveitsissä testiradalla. Tulokset osoittivat muun muassa pohjainten käytön parantaneen geometrian pysyvyyttä. (Veit, Marschnig 2009, UIC 2009) Itävallassa tehdyn tutkimuksen perusteella pohjainten käytöllä on saavutettu 15 % sisäinen korkokanta ja todettu että, pohjaininvestoinnin kannattavuus kasvaa liikennemäärän lisääntyessä. Myös erilaisten pölkkytyyppien ja pohjainten yhteiskäytöstä on tehty tutkimuksia, joiden tuloksena esimerkiksi tukemisen taajuutta on voitu harventaa kolmesta vuodesta yli seitsemään vuoteen standardiratkaisuun verrattaessa. (Veit, Marschnig 2011)

6.4 Kiskot

6.4.1 Rakenneosan tehtävät ja vaurioitumismekanismit

Kiskojen tehtävänä on kantaa liikenteen kuormitus ja siirtää se ratapölkkyjen kautta edelleen rakenteisiin. Kisko ohjaa myös junan pyörien kulkua. Kiskot takaavat liikenteelle tasaisen kulkualusta ja riittävästi kitkaa kiihdytystä ja jarrutusta varten.

Kiskot valmistetaan teräksestä valamalla ja valssaamalla. Kiskojen valmistuksen kriteerit on esitetty standardissa EN 13674-1. Kiskot luokitellaan niiden metripainon mukaan. Kiskoille ja kiskon jatkoksille asetettuja vaatimuksia on esitetty Ratateknisten ohjeiden osissa 11 ja 13 ja kiskojen teknisissä toimitusehdoissa (Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002; Ratahallintokeskus 2004b; Ratatekniset ohjeet. Osa 13 2004). Suomessa käytetään pääasiassa kiskoja, joiden metripaino on 54 tai 60 kg. Suomessa on käytetty aikaisemmin myös muita kiskotyyppisiä, mutta nykyisin hankittavien kiskojen profiileina saa olla ainoastaan 54 E 1 ja 60 E 1. Kauppinen (2010) mukaan Suomen rataverkolla on muita kiskoprofiileja vain hieman yli 20 %.

Kiskojen käyttöikä määritellään liikennemäärän mukaan siten, että kiskotyypeille on annettu ohjeelliset vaihtorajat. Vaihtoraja 54 E 1 – profiilin kiskolle on 300 Mbrt ja 60

E 1 - profiilille 450 Mbrt. Kiskoja uusinta tehdään silloin, kun radan tarkastuksessa havaitut kulumisen ja vikatiheyden raja-arvot ylittyvät. Kiskoja käyttöikä voidaan pidentää erilaisilla kunnossapitotoimenpiteillä, joita ovat esimerkiksi kiskoja hionta ja voitelu. Kiskoja voidaan myös kierrättää siten, että käytöstä poistettuja kiskoja käytetään vähäliikenteisillä radoilla. Kiskoja kierrätykseen liittyvät kunnostuskustannukset ovat Tuomisen (2004) mukaan olleet keskimäärin 20 000 €/raide-km. (Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002; Ratatekniset ohjeet. Osa 13 2004)

Suomessa uusitaan Kauppinen (2010) mukaan kiskoja 100–200 km vuodessa. Suurin osa uusituista kiskoista poistetaan radasta ennen kuin ohjeellinen vaihtoraja on täytynyt, mutta myös ohjeellisen vaihtorajan ylittäviä kiskoja on vielä käytössä. Kiskoja uusitaan yleensä muiden päällysrakennetöiden yhteydessä. Tuomisen (2004) mukaan kiskoja hionta- ja hitsauskustannukset ovat vuoden 2004 hintatasossa 61200 €/raide-km. Kiskoja hiontaa tehdään 300–400 km vuodessa kulkupinnan tasaisuuden ja profiilin korjaamiseksi. Kiskonhionnan kustannuksiksi Tuomisen (2004) on arvioinut noin 1,5 miljoonaa €/vuosi.

Kiskoihin syntyvät viat voidaan jakaa kolmeen erilaiseen pääryhmään: kiskon valmistusvirheet, kiskoja virheellinen käsittely tai käyttö tai materiaalin toistuvasta kuormituksesta syntyvät viat. Kiskoja viat luokitellaan vian vakavuuden mukaan neljään luokkaan. Lisäksi viat luokitellaan tyyppittäin UIC:n määrelehden 712 mukaisesti vian esiintymispaikan ja tyyppin mukaisesti kolme- tai neljänumeroisilla koodeilla. Suomessa yleisin kiskovika on niin kutsuttu ympärilyönti, joka johtuu junan pyörien luistamisesta esimerkiksi jyrkissä ylämäissä, liiallisen kiihdyttämisen seurauksena tai liian pienestä vetovoimasta kuormaan nähden. (Kauppinen 2010)

Kiskon käyttöikä ja kiskon heikkenemiseen vaikuttavat kiskon materiaali, valmistusprosessi, kiskoprofiili, jatkoshitsit sekä liikenteestä tulevat kuormitukset ja kiskon alapuolisista rakenteista saama tuki. Mahdollinen ympäristöstä tuleva kuormitus korroosion muodossa ja mahdollisen käytön tai asennuksen aikaiset virheet voivat myös heikentää kiskoja kuntoa. Kiskon kiskon heikkenemiseen liittyvät ilmiöt ovat kuluminen, väsyminen, korroosio ja plastinen muodonmuutos. (Kauppinen 2010)

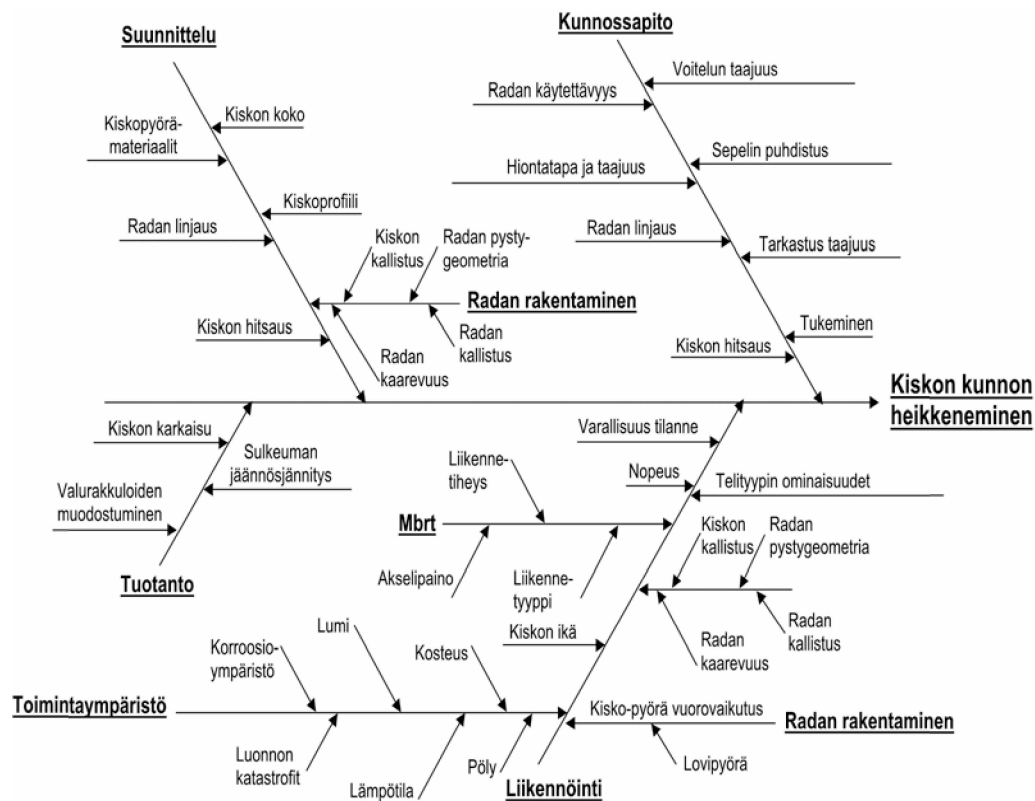
Kiskon valmistukseen liittyvät vaurioitumismekanismit ovat nykyisillä kehittyneillä valmistusmenetelmillä melko harvinaisia. Hankittavan kiskotyyppin oikealla valinnalla vaikutetaan luonnollisesti käyttöikä huomattavasti. Kiskoja asennuksesta aiheutuvat vauriot ja vaurioitumismekanismit johtuvat useimmiten hitsien laadusta ja muista käsittelyyn liittyvistä mekaanisista vaurioista. Kiskoteräs voi muokkautua plastisesti esim. kaarteissa, mikäli jännitys kontaktissa ylittää teräksen myötölujuuden. Väärinkäytöksi voidaan lukea esimerkiksi pyörän ympärilyönti tai kiskon vaurioituminen esim. vasaran iskusta. (Kauppinen 2010).

Kiskoon kohdistuvat kuormitukset syntyvät staattisesta tekijästä eli junan painosta ja dynaamisesta tekijästä, jonka voivat aiheuttaa joko kaluston pyörän epäjatkuvuuskohta tai kiskossa oleva epäjatkuvuuskohta. Myös radan muiden osien tai jatkosten heikko kunto ja radan huono geometria voivat kasvattaa dynaamisia kuormia. Suuremmat kuormat johtavat nopeampaan kiskon heikkenemiseen. Liikennemäärät ja liikenteen laatu, kuten kalustotyyppi ja nopeus, vaikuttavat kulumiseen ja väsymiseen. (Kauppinen 2010)

Kiskoja kiskon heikkenemisprosessit voidaan jakaa kulumiseen ja siihen liittyvään korrugaatioon, vierintäväsymiseen (RCF) ja väsymiseen. Kuluminen on yleensä ver-

rannollista kokonaiskuormitukseen, kun taas vierintäväsytymisen syynä ovat kiskopyöräkontaktissa syntyvät toistuvat ylikuormitukset. Lisäksi vikoja aiheuttavat vaikeammin ennakoitavat asiat, kuten onnettomuudet, sisäiset materiaaliveirheet, liitoskohien virheet, likaantuminen ja työ- ja käsittelyvirheet.

Kiskon kunnan kehittymiseen vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 44. Kunnan kehittymiseen vaikuttaviksi päätekijöiksi Kumar (2008) on nimennyt (I) kiskon ja rata-rakenteen suunnitteluun liittyvät tekijät, (II) kiskojen valmistukseen liittyvät tekijät, (III) kiskojen ja päällysrakenteen tarkastuksiin ja kunnossapitoon liittyvät tekijät sekä (IV) liikenteeseen ja toimintaympäristöön liittyvät tekijät. Jokaisesta tekijästä löytyy huomattava määrä muuttujia, joilla on erilainen vaikutus käyttöikänsä. Kunnan kehittyminen tai vaurioituminen on näin ollen usean eri tekijän ja niiden keskinäisen vuorovaikutuksen summa. Radan rakenteelliset tekijät vaikuttavat sekä suunnittelun että käytön aikana kiskon kunnan kehittymiseen.



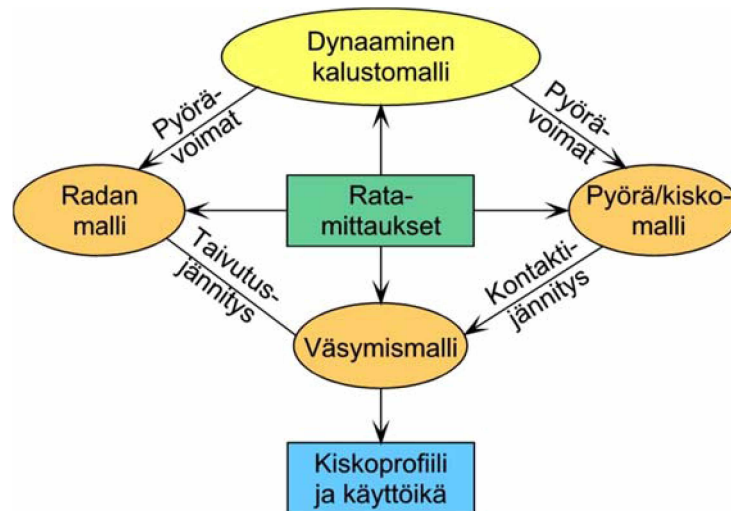
Kuva 44. Kiskon kunnan kehittymiseen vaikuttavat tekijät. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Kumar 2008).

6.4.2 Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista

Kiskojen elinkaaresta ja kiskojen vaurioitumismekanismeista on tehty huomattava määrä kansainvälistä tutkimusta, koska kisko mielletään yhdeksi kalleimmista rata-rakenteeseen liittyvistä komponenteista. Lisäksi kiskojen vaurioituminen ja rikkoutuminen on myös turvallisuuden näkökulmasta merkittävä tekijä. Useissa tutkimuksissa on syvennyt hyvinkin yksityiskohtaisesti selvittämään esimerkiksi kiskoon syntyvän halkeaman etenemistä tai erilaisten vauriotyyppien syntymisen syitä. (Zerbst, Schödel & Heyder 2009) (Zhao et al. 2006, Jaiswal et al. 2002)

Kiskoihin liittyvissä tutkimuksissa käsitellään kiskon materiaalitekniisiä lähtökohtia, kiskon kulumista, kiskon rikkoutumista, kiskojen kunnossapitoon liittyviä toimenpiteitä sekä kaluston ja kiskon välisiä vuorovaikutuksia. Myös investointeihin liittyviä taloudellisuustarkasteluja on tehty useita. Paikallisiin olosuhteisiin perustuviissa kunnan kehittymisen malleissa lähtöarvona käytetty empiirinen tieto liittyy usein raskaaseen liikenteeseen ja tiettyyn ratarakenneratkaisuun. Näin ollen kehitetyt mallitkin ovat sovellettavissa usein vain tietyn tyyppiselle liikenteelle tietyissä olosuhteissa. Seuraavassa on esitetty valikoituja esimerkkejä kiskon elinkaareen liittyvistä taloudellisuustarkasteluista.

Jaiswal et al. (2002) ovat yhdistäneet erilaisia radan komponenttien numeerisia ja analyyttisiä malleja kaupallisista ohjelmistoista ja koonneet niistä kuvassa 45 havainnollistetun TSM-mallin (Track System Model). Laskelmien perusteella voitiin todeta, että yhdistämällä käytännön mittaustiedot voitiin ennustaa kiskojen käyttöikä ja mahdollisesti tulevaisuudessa kehittää analyyttinen työkalu esimerkiksi kiskojen hionnan optimointiin. (Jaiswal et al. 2002)



Kuva 45. Esimerkki kiskoon liittyvien mallien liittymisestä koko ratarakenteen malliin. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Jaiswal et al. 2002).

Innotrack projektissa on tutkittu erilaisten kiskotyyppien valintaan liittyviä elinkaarikustannuksia. Hankkeissa verrattiin 40 % kalliimman kiskotyyppin investointi- ja kunnossapitokustannuksia käyttäen Network Railin kunnossapitokriteereitä. Perusvaihtoehtona oli teräslaatu 260 ja vertailuvaihtoehtona Cr370. Laskelmien tuloksena todettiin muun muassa, että kiskon käyttöikä pidentäminen kovemalla kiskomateriaalilla ei aina pienennä elinkaarikustannuksia. Vaurioitumisnopeuden (kuluminen ja RCF) laskennassa käytettiin Network Railin TrackEx ohjelmistoa, joka perustuu kiskon ja pyörän kontaktikohdan energiahäviöiden laskentaan. Esimerkiksi tapauksissa, joissa kaarresäde oli 1500-2500 metriä, mitatut ja mallinnetut vaurioitumisnopeudet olivat niin pieniä, että pehmeämmän kiskotyyppin valinta on taloudellisesti edullisempaa 40 vuoden tarkastelujaksolla. Tutkimusten perusteella on myös todettu, että kiskotyyppin valinnan pitäisi perustua kiskon kunnan heikkenemisnopeuteen kyseisellä rataosalla eikä pelkästään radan kaarresäteeseen ja liikennemäärään. Analyysien lopputulokset osoittivat kuitenkin, että tietyissä kohteissa kovemman kiskotyyppin valinnalla voitiin pienentää elinkaarikustannuksia 11...30 %. Säästöjen vaikutus Network

Railin koko kunnossapito- ja investointibudjettiin olisi ollut 1,3...2,6 % vuodessa. (Innotrack Deliverable D1.4.8 2009)

Öberg ja Andersson (2009) ovat kehittäneet mallin radan vaurioitumisen kustannusten laskentaa varten. Kiskojen osalta mallissa huomioidaan kiskon kulumisen ja vierintäväsymisen. Mallia on sovellettu Ruotsin rataverkolla ja laskelmien perusteella on todettu, että erilaiset kalustotyypit vaikuttavat eri tavalla kulumiseen/vaurioitumiseen. Tutkijoiden mukaan radan painuminen ja komponenttien väsyminen ovat verrannollisia pyöräkuorman kolmanteen potenssiin ja näin ollen vaurioituminen lisääntyy jatkuvasti akselipainon kasvaessa. Myös jousittamaton massa ja gravitaatiokeskipiste vaikuttavat vaurioitumiseen. Pyöräkerran kulkuominaisuuksilla on ratkaiseva vaikutus kiskon kulumiseen ja vierintäväsymiseen. (Öberg, Andersson 2009)

Birmighamin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa on kehitetty kiskon katkeamisen aiheuttamien radalta suistumisien riskianalyysimalli. Riskinarviointia varten on kehitetty kaksi mallia, joilla ennustetaan kiskovikojen ja katkeamisten esiintymistä. Isossa-Britanniassa yhden kiskoilta suistumisen kustannukset on arvioitu noin kuudeksi miljoonaksi punnaksi ja suurimmaksi suistumisten syyksi on arvioitu kiskojen katkeaminen. Riskinarviointia on tehty käyttämällä tilastollisia menetelmiä. Artikkelissa (Jianmin, Chan & Stirling 2006) esitetään menettelytapa, jonka avulla voidaan ennakoita kiskojen katkeamisen aiheuttamia suistumisia ja kuinka ennakoivalla kunnossapidolla voidaan pienentää riskiä.

Jiamin et. al. (2006) mukaan radalta suistumisia voidaan vähentää säännöllisillä tarkastuksilla ja kiskojen hionnalla. Tarkastusten määrän lisääminen kolmesta kymmeneen pienentää suistumisriskiä, mutta lisätarkastusten aiheuttamiin kustannuksiin ei kuitenkaan oteta kantaa. Laskelmilla voidaan siis osoittaa, että liikennemäärän (bruttotonneina) kasvaessa kiskon luotettavuus vähenee. Tehtyjen laskelmien mukaan kertyneen liikennemäärän ollessa 350 Mbrt, suistumisriski on kuusi kertaa suurempi kuin uudella kiskolla. (Jianmin, Chan & Stirling 2006) Norjalaiset ovat hieman erilaisella tarkastelu- ja laskentamenettelyllä pystyneet optimoimaan tarkastusvälin liikennemäärän mukaan, ja itse asiassa ovat päätyneet harventamaan tarkastusväliä ja säästäneet tarkastuskustannuksissa (Lyngby, Hokstad & Vatn 2008).

Kumar (2008) on lisensiaattityössään luokitellut kiskon vaurioitumisen vähentämisen keinot kolmeen luokkaan sen mukaan, mikä vaurioitumisprosessi on kyseessä. Kiskon kulumisen vähentämisen ensisijaisena keinona Kumar pitää kiskon voitelua. RCF ilmiön ensisijainen estämiskeino on kiskon hionta ja hitsien vaurioiden vähentämisen keinot liittyvät hitsien laatutekijöihin kuten materiaali- ja työtekniikkavalintoihin sekä ilmasto-olosuhteisiin. (Kumar 2006)

Muiden rakenneosien vaikutuksesta kiskon toimintaan ja vaurioitumiseen on tehty paljon tutkimusta. Yleisesti voidaan todeta, että kiskon alla olevien materiaalien kimmoisuudella on suurin vaikutus kiskon kunnon kehittymiseen. Kimmoisuuteen vaikuttavat esimerkiksi ratapölkkyjen materiaali, kiskon kiinnitykset, pölkkyjako sekä rakennekerrosten ja pohjamaan moduulit. (Schmid et al. 2010)

Network Rail on tehnyt huomattavan määrän tutkimustyöstä kiskon vaurioitumismekanismista ja pyrkinyt verifioimaan teoreettisia näkökantoja myös käytännön mittauksissa. Tutkimuksissa on muun muassa pystytty kehittämään vierintäväsymisen aiheuttamia säröjä ennustava energiatekijä. Myös väsymiseen liittyviä dynaamisia tekijöitä on pystytty mallintamaan. Kiskojen vaurioitumismekanismitutkimukseen liittyy

läheisesti myös liikkuvan kaluston dynamiikan mallintamisen työkalujen kehittäminen. (Burstow 2004)

Yhteenvetona kiskoista tehdyistä tutkimuksista voidaan todeta, että kiskon käyttökään liittyvää tutkimusta on tehty hyvin paljon ja sen hyödyntämispotentiaalia erityisesti Suomen olosuhteissa tulisi tarkastella selvästi laajemmin kuin tässä yhteydessä oli mahdollista. Kunnan kehittymisen arvioimiseksi tarvitaan yksityiskohtaista tietoa erilaisten tarkastus- ja kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksista sekä kiskon, rakenneosien ja kuormituksen vuorovaikutuksesta.

6.5 Rakenneosiin ja kalustoon liittyvät vuorovaikutussuhteet

Myös liikkuvan kaluston ja ratarakenteen välisistä vuorovaikutussuhteista on tehty huomattava määrä kansainvälistä tutkimusta. Tutkimukset keskittyvät muun muassa pyörä-kiskokontaktin yksityiskohtaiseen määrittelyyn ja mallintamiseen, kaluston telien tai pyöräkertojen rakenteellisiin tekijöihin, kaluston tai kaluston komponenttien elinkaareen tai radan geometristen ominaisuuksien vaikutukseen. Mekaaniset vuorovaikutussuhteet ovat monimutkaisia ja niiden mallintamiseen tarvitaan huomattava määrä teknistä osaamista.

6.5.1 Vuorovaikutus- ja vaurioitumismekanismit

Suomen sisäiseen liikennöintiin hyväksyttävän kaluston on täytettävä Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet (LIMO) osassa 1 asetetut vaatimukset. Ohjeessa määritellään muun muassa kaluston rataa aiheuttamat sallitut rasitukset. Vaatimuksia asetetaan muun muassa seuraaville ominaisuuksille: dynaaminen pyöräpaino, kvasistaattinen pyöräpaino pienisäteisissä kaarteissa, kvasistaattinen poikittaisvoima pienisäteisissä kaarteissa ja raiteeseen kohdistuva poikittaisvoima 2 metrin matkalla. (Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet 2006). Liikkuvan kaluston ohjeet tullaan lähiaikoina julkaisemaan uudessa Ratateknisten ohjeiden osassa 21. Nykyinen Suomessa käytössä oleva kalusto on hyväksytty LIMO-ohjeiden mukaisesti, mutta esimerkiksi uudet tavaravaunut tullaan hyväksymään YTE-ohjeiden mukaisesti (Korkeamäki 2010).

Liikkuvan kaluston ja ratarakenteiden välisen vuorovaikutuksen ymmärtäminen vaatii sekä kaluston erityispiirteiden että ratarakenteiden tuntemista ja monimutkaisten vaikutusmekanismien ymmärtämistä. Kaluston ja rakenteen vuorovaikutusta ja vaurioitumismekanismeja voidaan tarkastella kolmella eri tasolla: kiskon ja kaluston välisen kontaktin mekaniikan kannalta, pyörän ja kiskon vuorovaikutuksen kannalta tai kaluston ja radan kokonaisyhteistoiminnan kannalta (Hakulinen, Korkeamäki & Nurmikolu 2011).

Pyörän ja kiskon välisessä kontaktissa kosketuskohdan kokoon ja muotoon sekä kontaktijännityksiin vaikuttavat muun muassa materiaalien ominaisuudet ja kontaktissa olevien kappaleiden kosketuskohtien kaarevuussäteet. Kontaktissa syntyvillä jännityksillä on merkittävä vaikutus muun muassa kiskon ja pyörien kulumiseen ja vierintäväsytymiseen. Kiskon pinnalla esiintyy luisumaa ja tangentiaalisia liukuvoimia, jotka vaikuttavat vaurioitumiseen. Pyörän ja kiskon kontaktissa tapahtuu luisumien takia energiahäviötä, jolla on havaittu olevan yhteys kulumiseen ja vierintäväsytymiseen.

(Hakulinen, Korkeamäki & Nurmikolu 2011) Pyörä-kisko-kontaktin laatu on pyörien ja kiskojen käyttökustannusten kannalta vähintään yhtä merkittävä tekijä kuin esimerkiksi akselikuorma. Pyörä-kisko-kontaktin kitkan pienentyminen edistää lovipyörien syntymistä, kitkaa heikentävät muun muassa lumi, vesi, lehdet ja muut epäpuhtaudet. (Korkeamäki 2010)

Pyöräprofiilin kartiokkuus vaikuttaa pyöräkerran käyttäytymiseen kaarteissa ja suoralla. Kartiokkuus ja telin jousituksen jäykkyys vaikuttavat kriittiseen nopeuteen, joka aiheuttaa epästabiilia kulkua. Tarkasteltaessa todellista pyöräkertaa puhutaan tehollisesta kartiokkuudesta. Teholliseen kartiokkuuteen vaikuttavat sekä pyörien että kiskojen profiilit ja niiden sijainti toisiensa suhteen. Pyöräkerran tehollinen kartiokkuus muuttuu kulumisen seurauksena. Pyöräkertojen liikkeitä vastustavat pyöräkerran ja telien kiinnityksien jäykkyydet ja lisäksi raidevälyksen rajallisuus rajoittaa pyöräkerran sivuttaissuuntaista liikkumista. Tämän takia pyörien ja kiskojen välillä tapahtuu luisumaa. Luisumien seurauksena pyöräkertaan kehittyy liukuvoimia, jotka pyrkivät kääntämään ja siirtämään pyöräkertaa. Edellä mainittuihin asioihin voidaan vaikuttaa muun muassa pyörä- ja kiskoprofiileilla sekä voitelulla. (Hakulinen, Korkeamäki & Nurmikolu 2011)

Kalustosta rataa kohdistuvat veto- ja jarrutusvoimat aiheuttavat rataa sekä pitkitäis- että poikittaissuuntaisia voimia. Vedossa ja jarrutuksessa syntyviin pitkittäissuuntaisiin voimiin vaikuttavat muun muassa pyörien ja kiskojen välinen kitka ja radan pituuskaltevuus. Kalustosta rataa kohdistuvat pitkittäissuuntaiset veto- ja jarrutusvoimat voivat esimerkiksi aiheuttaa kiskoja vaellusta ja lisätä raiteen sivuttaissuuntaisen aseman muuttumisen riskiä. (Hakulinen, Korkeamäki & Nurmikolu 2011)

Kaluston massa vaikuttaa rataa kohdistuvan staattisen kuormituksen suuruuteen. Kuormituksen jakautumiseen vaikuttavat akselien ja telien sijainnit sekä lastauksesta riippuen mahdollisesti epätasaisesti jakautunut kuorma. Vakaan tilan kaaroksessa kehittyviin kvasistaattisiin voimiin vaikuttavat muun muassa radan kaarresäde, raiteen kallistus ja kulkuneuvon nopeus. Vaunun ja telin jousituksen ominaisuudet sekä pyörien ja kiskoja kontaktiolosuhteet vaikuttavat kokonaisvoiman jakautumiseen pyörien kesken ja voimakomponenttien suuruuksiin. Jos kalustosta rataa kohdistuva poikittaissuuntaainen kokonaisvoima kasvaa liian suureksi, voivat ratapölkkyt liikkua tukikerroksessa ja aiheuttaa pysyvän muutoksen radan geometriaan. (Hakulinen, Korkeamäki & Nurmikolu 2011)

Kaluston ja radan välisessä vuorovaikutuksessa dynaamiseen kuormitukseen vaikuttavat kulkuneuvon ja radan dynamiikka sekä kulkuneuvon ja radan keskinäinen vuorovaikutus. Esimerkiksi radan geometrian vaihtelu vaikuttaa kulkuneuvon käyttäytymiseen. Radan geometrian vaihtelut toimivat dynaamisena herätteenä ja aiheuttavat dynaamisia voimia. (Hakulinen, Korkeamäki & Nurmikolu 2011)

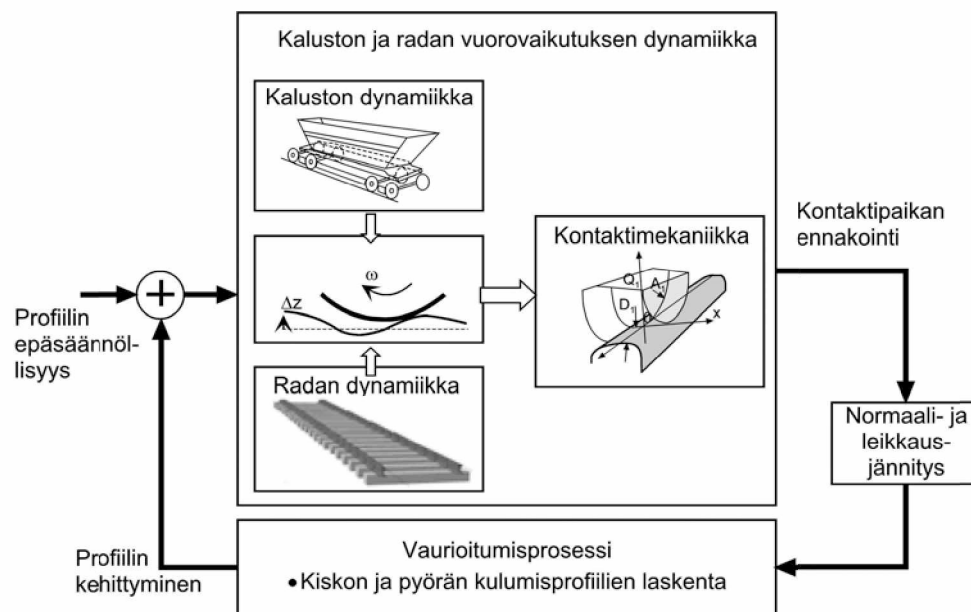
Pyörä-kisko-kontaktin laatu, kaluston kulkuominaisuudet sekä pyörän ja kiskon materiaalit yhdessä määrittelevät suurelta osin pyöräkertojen ja kiskon kulumisnopeuden sekä määräävät osaltaan pyöräkertoihin ja raiteeseen kehittyvien vikoja määrän. Yleisessä tapauksessa rataa ja pyöräkertoihin syntyvillä vioilla on huomattavasti suuremmat vaikutukset radan ja kaluston huollontarpeeseen kuin esimerkiksi maltillisella akselikuorman lisäämisellä. Viat aiheuttavat dynaamisia lisäkuormituksia, jotka lyhentävät muun muassa betonipölkkyjen käyttöikää. Akselikuorma ja akselien sijainti määrittelevät yhdessä matalataajuuksien dynaamisten kuormitusten kanssa radan rakennekerrosten vaurioitumisnopeuden. Huonokuntoinen rata tai huonosti toi-

miva kalusto aiheuttaa lisääntyntä huollontarvetta niin rataa kuin kalustoonkin. Korkeamäen mukaan kirjallisuudessa esitetyt tulokset osoittavat raskaan tavaravau-nuliikenteen aiheuttavan valtaosan sekaliikenteen aiheuttamasta radan kunnan hei-kentymisestä. (Korkeamäki 2010)

6.5.2 Esimerkkejä elinkaaritaloudellisuustarkasteluista

Kaluston ja ratarakenteen vuorovaikutusten arvioinnissa voidaan käyttää mekanisti-sia malleihin perustuvia mallinnustyökaluja. Ratarakenteen ja kisko-pyöräkontaktin mallintamisessa voidaan käyttää esimerkiksi FEM-laskentaa. Kaluston mallintami-seen voidaan käyttää monikappaledynamiikan (MBD) ohjelmistoja. Erilaisia malleja on analysoitu muun muassa Innotrack projektissa (Innotrack D1.3.6 2009) sekä syk-syllä 2010 ilmestyneessä Wheel-Rail Best Practice -käsikirjassa (Schmid et al. 2010).

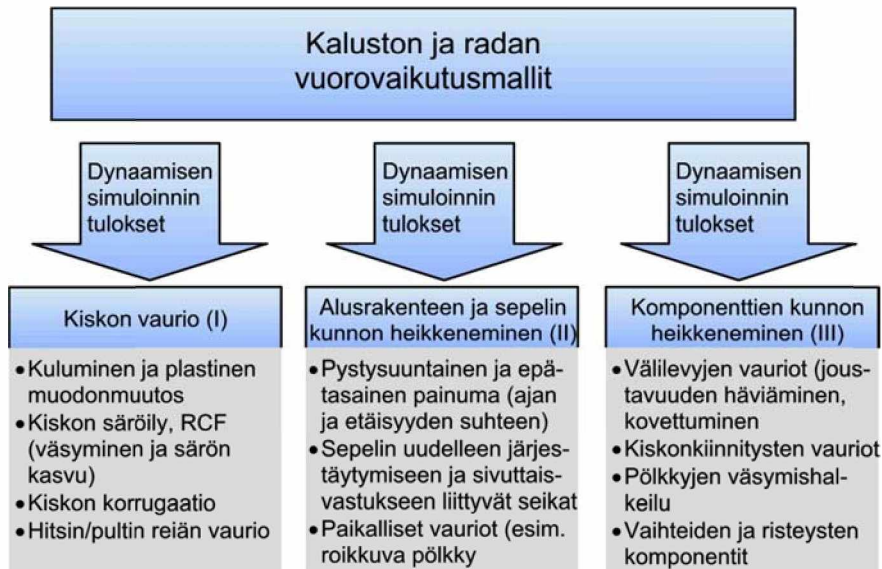
Korkeatasoisten mallinnustyökalujen avulla voidaan kuvata esimerkiksi kiskon tai pölkyn siirtymiä, kiihtyvyyksiä ja nopeuksia. Lisäksi voidaan tutkia pyörä-kisko-kontaktin ominaisuuksia, kuten kontaktin paikkaa, muotoa ja kontaktin normaali- ja tangentialiaalisia voimia. Mallien avulla saadaan myös tietoa radan rakenteessa esiintyvistä voimista, kuten esimerkiksi pölkyn ja sepelin välisistä voimista sekä kiskon kiin-tityksissä esiintyvistä voimista. Kaluston ja radan välisen vuorovaikutuksen dyna-miikkaa ja sen osatekijöitä on esitelty kuvassa 46.



Kuva 46. Kaluston ja radan välisessä vuorovaikutuksessa syntyvien dynaamisten tekijöiden ja vaurioitusprosessien keskinäinen yhteys. Kuva on kää-netty suomeksi julkaisusta (Innotrack D1.3.6 2009).

Myös radan eri komponenttien jännitystilaa ja kuormituksia voidaan kuvata mallien avulla. Näitä fysikaalisia mallinnettuja suureita voidaan hyödyntää syöttöarvoina ra-dan kunnan kehittymisen malleihin. Vuorovaikutusmalleja voidaan yhdistää kunnan kehittymisen malleihin ja hyödyntää esimerkiksi erilaisten rakenne- tai kalustovaih-toehtojen vertailututkimuksissa. Kuvassa 47 on esitetty esimerkki kaluston ja radan vuorovaikutusmallien yhdistämisestä ja yhdistelmämallien avulla tutkittavista vauri-

oista. Mallintamisessa tietoa tuotetaan usein simuloimalla testiajoneuvoa tietyllä rataosalla. Malleja käytettäessä on huomioitava, että mallin kehitystyö perustuu tiettyihin oletuksiin ja reunaehtoihin sekä määritellyissä olosuhteissa tehtyihin mittauksiin. (Innotrack D1.3.6 2009)



Kuva 47. Esimerkkejä kaluston ja radan vuorovaikutusmalleilla tutkittavista vaurioista. Kuva on käännetty suomeksi julkaisusta (Innotrack D1.3.6 2009).

Elinkaarianalyysin avulla on selvitetty pyörän vaihtoon johtavan vaurioituneen pyörän kuormituksen raja-arvoa. Optimaalinen raja-arvo vaihtamiselle on se hetki, jolloin pyörän vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset ovat yhtä suuret kuin sen aiheuttamista vaurioista syntyvät kustannukset, jos pyörää ei vaihdeta. Elinkaarilaskelmat voidaan tehdä esimerkiksi empiirisen kunnan kehittymisen mallin perusteella. (Schmid et al. 2010)

Kaluston dynaamiseen mallinnukseen on kehitetty useita ohjelmistoja, joista mainittakoon Vampire, Gensys, Simpack, Nucars ja Adams Rail. Ohjelmistojen avulla voidaan esimerkiksi mallintaa kaluston suistumisriskiä suhteessa pyörään kohdistuvaan pysty- ja poikittaissuuntaiseen voimaan. (Korkeamäki 2010) Mallinnusohjelmia voidaan hyödyntää myös elinkaaritaloudellisuustarkasteluissa esimerkiksi simuloimalla kisko-pyöräkontaktissa syntyviä voimia (Nielsen 2008, Froehling 2007) tai turvallisuusriskejä ja niiden aiheuttamia kustannuksia (Dos Santos et al. 2010).

Pyörän kulumista voidaan mallintaa esimerkiksi laboratoriotestauksen perusteella. Laboratoriotestien perusteella kehitettyyn pyörän kulumismalliin voidaan yhdistää pyörä-kisko-kontaktin malli ja kaluston malli. Kehitetyllä yhdistelmämallialeilla saatuja tuloksia voidaan verrata esimerkiksi käytännön kulumistestien tuloksiin. Esimerkiksi Braghin et al. (2006) ovat tutkimuksissaan todenneet, että laboratoriotesteihin perustuvalla mallinnuksella laipan kulumisen ylikorostuu verrattaessa käytännön koekiden tuloksiin. Toisaalta kuitenkin monet numeerisella mallinnuksella saadut tulokset voitiin todentaa myös käytännössä. Pyöräkertaan liittyvissä tutkimuksissa on todettu, että pyörän profilointi noin 200 000 km jälkeen lähes kaksinkertaistaa pyörän käyttöiän ja näin ollen myös pienentää elinkaarikustannuksia. (Braghin et al. 2006)

7 Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

7.1 Yhteenveto

Ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arviointi on laaja kokonaisuus, jota voidaan käsitellä useista eri näkökulmista, eli osana koko rataympäristön taloudellisuustarkastelua tai keskittyen yksittäisen ratarakenteen komponentin kunnan kehittymiseen ja elinkaaritaloudellisuuteen. Elinkaaritaloudellisuuden arviointiin liittyy kiinteästi myös rakenteen ja sen komponenttien kunnossapidon taloudellisuustarkastelu. Koska kirjallisuusselvityksellä katettava alue on niin laaja, selvityksen ensisijaisena tavoitteena on ollut hahmottaa tutkimuksen nykytilaa yleisellä tasolla ja etsiä kirjallisuudesta sellaisia esimerkkejä, joita voitaisiin mahdollisesti soveltaa suomalaiseen toimintaympäristöön.

Rataympäristön ja ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuteen liittyvää tutkimusta on tehty ja raportoitu erittäin suuri määrä. Kirjallisuusviitteitä löytyi yli 500 kappaletta. Kirjallisuudesta oli havaittavissa, että elinkaaritaloudellisuuteen liittyvä tutkimus on useimmiten paikallisen rataverkoston ja liikenteen tarpeiden mukaan kehittyntä, esimerkiksi kaivosteollisuuden kuljetustarpeet ovat olleet useissa maissa tutkimuksen lähtökohtana. Myös nopean junaliikenteen tarpeet ovat käynnistäneet useissa tapauksissa hankkeita, joiden avulla on pyritty vilkkaasti liikennöityjen nopean liikenteen ratojen kunnossapidon optimointiin. Vanhan rataverkon kehittäminen nykyistä liikennekuormitusta ja nopeuksia vastaavaksi on ollut myös tutkimushankkeiden käynnistävä tekijä. Rata-alan toimintaympäristön muutokset yksityistämisen ja esimerkiksi kunnossapidon kilpailuttamisen myötä ovat myös synnyttäneet tarpeen kehittää toimintaa ja järjestelmien hallintaa. Myös eurooppalainen rataympäristöön liittyvä teknisten eritelmiä käyttöönotto ja standardointi luovat kaikille rata-alan toimijoille uusia vaatimuksia tiedon hallinnan kannalta.

Elinkaariarvioinnin ja –kustannuslaskennan ensimmäisenä edellytyksenä on laskelmissa tarvittavan tiedon systemaattinen kerääminen ja reaaliaikainen hallinta. Tämä tehtävä ei kuitenkaan ole yksinkertainen, koska ratatietoa on perinteisesti sekä Suomessa että muissa Euroopan maissa kerätty ja arkistoitu useisiin eri tietokantoihin ja järjestelmiin. Myös radan kunnossapidossa syntyvien kustannusten luokittelu elinkaarikustannuslaskentaa varten vaihtelee eri maissa. Kustannusten luokittelu saattaa olla tulevaisuudessa vielä haastavampaa, koska kunnossapitoa kilpailutetaan, eikä yksikkökustannuksia enää välttämättä raportoida lainkaan vaan tieto jää kunnossapitäjän omiin järjestelmiin. Osa rakenteiden toimintaan ja käyttöikään liittyvistä tiedoista on myös asiantuntijuuteen perustuvaa.

Ratarakenteen tai sen komponentin toimintaa ja siihen elinkaaren aikana vaikuttavia tekijöitä voidaan kuvata periaatteellisella tasolla useilla eri menetelmillä. Koska rataympäristössä kaikki vaikuttaa kaikkeen, on myös erittäin tärkeää pystyä hahmotamaan eri komponenttien keskinäinen vuorovaikutus. Useiden asioiden yhtäaikainen hallinta edellyttää, että mallintamisessa käytettävät menetelmät ja työkalut sisältävät myös todennäköisyyslaskentaa perustuvia osia.

Rataympäristön elinkaariarviointiin liittyvää tutkimusta on tehty ja tehdään jatkossakin useissa eurooppalaisissa yhteistutkimuksissa. Myös UIC on aktiivinen toimija erilaisten yhteishankkeiden koordinoijana. Yhteistutkimuksissa on kartoitettu eri Euroo-

pan maiden käytäntöjä, kehitetty elinkaarikustannuslaskennan järjestelmiä ja esitetty suosituksia hyviksi havaituista toimintatavoista. Joissakin hankkeissa kehitettyjä järjestelmiä on myös jatkojalostettu kaupalliseksi tuotteeksi. Tästä esimerkkinä on Ecotrack-hankkeen lopputuotteena syntynyt ohjelmistopaketti.

Ratarakenteen elinkaariarvioinnin kannalta on erittäin tärkeää tuntea kunnan kehittymisen prosessit ja niihin vaikuttavat tekijät. Kunnan kehittymistä voidaan mallintaa lähtien liikkeelle todellisista olosuhteista ja radan tai rakenneosien tarkasta mekaanisesta käyttäytymisestä. Mekaanisen käyttäytymisen perusteella luodaan kunnan kehittymiselle funktiot, joita voi olla useita tuhansia tai enemmänkin, jos tarkoitus on tutkia esimerkiksi jonkun rataosan tai koko rataverkon kokonaiskäyttäytymistä. Vaihtoehtoinen lähestymistapa on ekonomistinen tai tilastollinen, jolloin lähdetään liikkeelle erilaisista rakenneosan tai radan toimintaa kuvaavista menetelmistä. Kun kuvaus tai malli on muodostettu, sen eri komponenttien riippuvuussuhteita ratkotaan erilaisilla matemaattisilla menetelmillä ja simuloinnilla.

Mekanistiset mallit perustuvat yleensä tietyille oletuksille ja empiiriselle kerätylle tiedolle. Mekanistiset mallit ovat yleensä tarkempia kuin tilastolliset mallit, erityisesti silloin kun tarkastellaan jonkun komponentin fysikaalisia muutoksia. Mekanististen mallien kehittäminen on kallista ja ne vaativat syvällistä rataympäristön komponenttien ja vuorovaikutussuhteiden ymmärtämistä. Toki mekanististen mallien kehittämisessäkin joudutaan käyttämään tilastollisia menetelmiä, jotta voidaan esimerkiksi tehdä epävarmuus- ja herkkyyсарviointia. Mekanistisilla malleilla laskettujen tulosten perusteella on osoitettu useimmiten tuottaneen myös taloudellisia hyötyjä liittyen esimerkiksi komponenttien käyttöikään tai kunnossapidon optimointiin.

Tilastollisten tai ekonomististen mallien avulla ennustetaan kunnan kehittymistä perustuen historiatietoon ja nykytilasta kerätyyn tietoon. Tilastolliset mallit soveltuvat tapauksiin, joissa rakenneosan käyttäytymisessä ei tapahdu äkillisiä muutoksia, jotka vaikuttavat mekaanisiin ominaisuuksiin tai muuttavat kunnan kehittymiseen trendiä. Melko useissa löydetyissä malleissa keskityttiin enemmän analyysimenetelmien kehittämiseen kuin mallien soveltamiseen todellisessa ympäristössä. Usein mallia testattiin vain yhdessä tapauksessa. Testaamisen niukkuus liittyy osittain myös tarvittavien lähtötietojen puutteellisuuteen.

Radan kulumisen rajakustannusten muodostumista ja sitä kautta liikennöijiltä perittäviä ratamaksuja on tutkittu useissa Euroopan maissa. Erilaiset käytössä olevat kustannusfunktiot johtavat suurehkoihin kustannuseroihin. Kaluston ominaisuuksien vaikutus kulumiseen ja syntyviin kustannuksiin on todettu merkittäväksi.

Kiskojen elinkaaresta ja kunnan kehittymisestä on tehty radan rakenneosista selvästi eniten tutkimusta. Myös useat koko ratarakenteen kunnan kehittymistä mallintavista järjestelmistä keskittyvät ensisijaisesti kiskoon tai kiskon ja liikkuvan kaluston väliin vuorovaikutukseen. Kiskoon keskittymisen perusteluna on käytetty sitä, että kiskot muodostavat suuren osan radan investointikustannuksista. Vähiten elinkaariarvointiin liittyvää tutkimusta on tehty ratarakenteen alus- ja pohjarakenteista.

Elinkaarilaskentaan, ratarakenteiden kunnan kehittymisen arviointiin ja liikkuvan kaluston simulointiin on tarjolla suuri määrä erilaisia ohjelmistoja. Osa ohjelmistoista on kehitetty räätälöitäviksi paikallisten olosuhteiden mukaan ja osa on kehitetty ensisijaisesti kehittäjien omia sovelluskohteita varten. Käyttöältään useita kymmeniä vuosia olevien ratarakenteiden kunnossapidon kustannukset muodostavat merkittä-

vän osan kokonaiskustannuksista. Kunnossapitokustannusten optimointia varten on kehitetty useita ohjelmistoja. Ohjelmistojen kehittämisen edellytyksenä on riittävän yksityiskohtaisen tiedon ja kustannusten selvittäminen koko rataverkolta.

Ratarakenteiden yksittäisten osien kunnan kehittämisen tutkimusta ja mallintamista tarkkaan mekanistiseen menettelyyn perustuen on Suomessa tehty ja tehdään sekä TERA-tutkimusohjelmassa että aiemmissa tutkimushankkeissa. Yksittäisen rakenneosan mallintaminen palvelee aina kokonaisuutta. Elinkaarikustannuslaskenta on kuitenkin ollut useissa hankkeissa hyvin pienessä roolissa, myöskään rakenteiden kunnossapidettävyyden arviointiin ei ole ollut käytettävissä riittävästi tutkimustietoa.

Rakenneosittain tehdystä tarkastelusta voidaan esittää seuraavat lyhyet yhteenvedot:

- Alus- ja pohjarakenteen kunnolla on merkittävä rooli muiden rakenneosien elinkaaren kannalta. Esimerkiksi epätasaisten painumien aiheuttamat nopeusrajoitukset johtavat vuodesta toiseen merkittäviin kunnossapito- tai viivytyskustannuksiin ja lyhentävät myös muiden rakenneosien elinkaarta.
- Tukikerroksen elinkaaritaloudellisuustarkastelut liittyvät sepelimateriaalin laatuksiteoreihin, tukikerroksen kunnossapitoon sekä muiden rakenneosien ja tukikerrosmateriaalin vuorovaikutuksen arviointiin. Tukikerroksen vaurioitumisen mittarina käytetään rakennenytyhteistä tai maatutkauksesta määritettyä hienontuneisuutta ja toiminnalliselta kannalta useimmiten raidegeometriamittauksissa saatuja poikkeamia. Tukikerroksen rooli on merkittävä arvioitaessa muiden päällysrakenteen osien kunnan kehittymistä.
- Ratapölkkyjen elinkaaritarkastelut liittyvät useimmiten pölkkyjen käyttöikään ja käyttöiän määrittelemään pölkkyjen uusimistiheyteen. Pölkkyjen kunnan arvioimiseen ei ole vielä olemassa esimerkiksi ainetta rikkomattomia menetelmiä. Myös betonipölkkyjen kehittäminen esimerkiksi pohjaimia käyttämällä on eräs päällysrakenteen kunnossapitotarpeeseen ja elinkaareen liittyvä tutkimusalue.
- Kiskojen käyttöikään liittyvää tutkimusta on tehty hyvin paljon ja sen hyödyntämispotentialiaa erityisesti Suomen olosuhteissa tulisi tarkastella selvästi laajemmin kuin tässä yhteydessä oli mahdollista. Kunnan kehittämisen arvioimiseksi tarvitaan yksityiskohtaista tietoa erilaisten tarkastus- ja kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksista kiskon, muiden rakenneosien ja kuormituksen vuorovaikutuksesta.
- Pyörä-kisko-kontaktin laatu, kaluston kulkuominaisuudet sekä pyörän ja kiskon materiaalit yhdessä määrittelevät suurelta osin pyöräkertojen ja kiskon kulumisnopeuden sekä määräävät osaltaan pyöräkertoihin ja raiteeseen kehittyvien vikojen määrän. Huonokuntoinen rata tai huonosti toimiva kalusto aiheuttaa lisääntyntä huollontarvetta niin rataa kuin kalustoonkin.

Elinkaarilaskennan soveltamisalueen rajaaminen vain itse ratarakenteeseen tai liikennöintiin liittyviin kustannuksiin on jo itsessään monimutkainen prosessi. Kun prosessiin liitetään esimerkiksi yhteiskunnalle aiheutuvat kustannukset tai hyödyt, se muodostuu yhä monimutkaisemmaksi. Periaatteessa kaikki kustannukset olisi otettava hyöty-kustannusanalyysissä huomioon, mutta käytännössä kaikkia kustannuksia ei pystytä selvittämään tai arvioimaan.

Elinkaarikustannusten arviointi on myös jatkuvasti kehittyvä prosessi ja käytettävät ohjelmistot kehittyvät koko ajan entistä paremmin erilaisiin olosuhteisiin räätälöitäviksi kokonaisuuksiksi. Myös toimintavarmuuteen, käyttövarmuuteen, kunnossapidettävyyteen ja turvallisuuteen liittyvät elementit ovat pikkuhiljaa tulossa osaksi elinkaa-

riarvioinnin prosessia. Vaikka näiden kaikkien RAMS-ominaisuuksien soveltaminen on haasteellista, ratarakenteisiin ensisijaisesti liittyvät toimintavarmuus ja kunnossapidettävyyys ovat tekijöitä, jotka voidaan huomioida elinkaarikustannuslaskennassa suhteellisen helposti.

7.2 Kirjallisuudesta havaittuja soveltamismahdollisuuksia

Kirjallisuuden ja suomalaisen ratarakenteiden asettamien reunaehtojen perusteella potentiaalisia soveltamismahdollisuuksia on useita. Soveltamisen mahdollisuuksia löytyy sekä mekanististen että ekonomististen mallien joukosta.

Kuten jo aikaisemmin on todettu elinkaarikustannuslaskennan ja -arvioinnin lähtökohta on systemaattinen kustannus- ja kuntotiedon luokittelu. Suomalainen kustannusten luokittelutapa ei tällä hetkellä täysin vastaa eurooppalaista yhteiseksi esitettyä käytäntöä. Myös ratatiedon rekistereiden hajanaisuus on haaste, mutta ratkennee ainakin osittain Ratapurkin käyttöä myötä.

Suomen ratarakenteista tuotetaan jatkuvasti kuntotietoa sekä radan kunnossapitäjien toimesta että radantarkastusmittauksilla. Myös mittaustoiminta kehittyy jatkuvasti. Rataverkolle ollaan asentamassa pyörävoimailmaisimia, joilla voidaan arvioida kalustosta rataa kohdistuvia voimia. Tätä mittaustietoa on mahdollista hyödyntää myös elinkaarilaskennan lähtöaineistona. Hyödyntämisen lähtökohtana voidaan käyttää esimerkiksi Australiassa ja Itävallassa kehitettyjä ratarakenteen kunnan kehittymisen malleja. Suomalaisen ratarakenteen kunnan kehittymisen funktioiden kehittäminen on siis mahdollista aloittaa ilman uusien parametrien mittaamisen edellyttämiä suuria investointeja. Mallien rakentaminen ei kuitenkaan tapahdu hetkessä vaan työ on aloitettava systemaattisen tiedon keräämisen mahdollisuuksien kartoittamisella esimerkiksi rataosittain valituista pilot-kohteista.

Vertailututkimusten mukaan rajakustannusten laskentamenettelyt ja kustannusfunktiot ja näin ollen liikennöijiltä perittävät maksut vaihtelivat eri Euroopan maissa ja kustannustasoissa oli huomattaviakin eroja. Erilaisten kustannusfunktioiden tarkempi analysointi ja laskentamenettelyn kehittäminen ovat potentiaalisia jatkotutkimuksen osa-alueita.

Kunnossapidon osuus ratarakenteen koko elinkaaren aikaisista kustannuksista on joidenkin lähteiden mukaan erittäin suuri. Tosin nykyisen tiedon mukaan Suomessa kunnossapitokustannusten osuus elinkaarikustannuksista ei ole niin suuri. Kunnossapidon optimointijärjestelmän kehittäminen voisi kuitenkin olla toimenpiteiden kohdentamisen hyödyllinen työkalu. Myös ratarakenteen eri komponenttien nykyisiä arvioituja käyttöiä on mahdollista tarkentaa elinkaarilaskelmien avulla. Kunnossapitojärjestelmän kehittäminen on potentiaalinen kehittämiskohde myös sen vuoksi, että toiminta on avattu kilpailulle. Kunnossapidon optimointia on mahdollista kokeilla jollakin nykyisin muissa maissa käytössä olevilla järjestelmällä. Suomalainen ratarakenteiden kunnossapitojärjestelmä perustuu vahvaan asiantuntijaosaamiseen, eikä järjestelmä tule poistamaan asiantuntijuuden tarvetta. Järjestelmä on vain yksi apuväline, jolla voidaan helpottaa vaihtoehtojen arviointia ja päätöksentekoa.

Vaikka RAMS-analyysin käyttö on vielä muuallakin alkutekijöissään erityisesti toimintavarmuuden ja kunnossapidettävyyden mittareiden ja arvioinnin kehittäminen ovat mielekkäitä tavoitteita niin investoinneissa kuin kunnossapidossa sovellettaviksi.

Radan kunto tietyllä rataosalla on ratarakenteen komponenttien kunnan funktio. Nykykunnan mittaamisella ei välttämättä saada tietoa eri komponenttien vaikutuksesta kuntoon. Ratarakenteen kunnan kehittymiselle on oltava joku yksiselitteinen parametri ja mittausmenetelmä, jonka muutoksen perusteella voidaan ryhtyä tarvittaviin toimenpiteisiin. Kunnosta kertova muuttuja ei välttämättä ole yksi mitattava suure vaan se voi olla useammasta muuttujasta laskettava summaparametri. Rataosittain tehtävät tarkastelut ovat usein liian karkeita. Jotta kunnan kehittymistä voidaan arvioida yksityiskohtaisemmin, on rataosa jaettava riittävän lyhyisiin homogeenisiin osiin.

Elinkaariarvioinnin tulokset eivät aina välttämättä johda kalliisiin investointeihin, koska joissakin tapauksissa ongelman poistaminen saattaa olla elinkaaritaloudellisesti kalliimpi vaihtoehto kuin se, että ongelmaa siedetään ja rataa pidetään kunnossa tihennetyksi. Usein tällaisissa tapauksissa tarkastelujen kriittisin tekijä on vaikeasti mitattavien kustannusten arviointi. Esimerkiksi routavaurioiden liikenteen viivytyksille tai koko raideliikennejärjestelmän imagon menetykselle aiheuttamien kustannusten merkitystä voidaan painottaa laskemissa eri tavoin.

7.3 Jatkotutkimussuositukset

Elinkaaritaloudellisuuden arvioinnista tähän mennessä tehtyjen selvitysten perusteella jatkotutkimusten tulisi kohdentua ensisijaisesti mekanististen elinkaarimallien kehittämiseen ja valikoituihin ekonomistisiin tarkasteluihin esimerkiksi rajakustannusten muodostumisen ja kunnossapidon optimointijärjestelmien kehittämisen näkökulmasta.

Suomessa ratarakenteista tehtävä tutkimus on monilta osin keskittynyt ja keskittyy jatkossakin radan rakenneosien mekaanisen käyttäytymisen mallintamiseen. Suomen rataverkolta mitataan sekä rakenteen kuntotietoa että liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutustietoa. Mitatun tiedon nykyistä tehokkaampi hyödyntäminen on eräs jatkotutkimuksen lähtökohdista. Yhdistämällä tutkimuksen avulla saavutettu tieto systemaattiseen kunto- ja kustannustietoon on mahdollista parantaa suomalaisten ratarakenteiden elinkaaritehokkuutta. Tutkimuksen toteuttaminen on mahdollista aloittaa valitsemalla rataverkolta pilottikohteet, joista olemassa oleva tieto kerätään kustannuslaskennan lähtötiedoiksi.

Pilottikohteiksi tulisi valita kolmesta viiteen sellaista kohdetta, joista on olemassa normaalin tarkastustiedon lisäksi muutakin tutkimus- tai vauriotietoa. Pilot-kohteista selvitetään myös yksityiskohtaiset kunnossapitotiedot sekä käytettyjen materiaalien ja liikenteen tiedot kustannuksineen. Pilottikohteiden valinta vaatii täydentäviä selvityksiä ja keskusteluja, mutta alustavina valintakriteereinä on suositeltavaa käyttää saatavissa olevan kunnossapito-, rakenne- ja liikennetiedon määrää, liikennemäärää ja kuormitusta sekä kunnossapitotasoa. Myös tietyillä rataosilla esiintyviä tyypillisiä ongelmia, kuten esimerkiksi routahaittoja, voidaan käyttää valinkriteerinä. Pilottikohteiden analyysin perusteella on mahdollista testata kehitettyä mallia myös muilla vastaavilla rataosilla.

Pilottikohteista kerätyn tiedon perusteella on mahdollista tehdä alustavia laskelmia ja malleja sekä kunnon kehittymisestä että elinkaarikustannuksista. Mallien ja laskelmien lähtökohtana käytetään Ruotsissa, Itävallassa ja Australiassa kehitettyjä mekanistisia malleja. Alustavien laskelmien tulosten perusteella on mahdollista kehittää edelleen mallien sisältöä ja mahdollisesti tarvittavien lisäparametrien mittaamista tai arviointia. Lopputuloksena on radan eri komponenttien kunnon kehittymisen ennakointiin perustuva mekanistinen malli, jonka avulla voidaan tehdä tarpeellisia kunnossapito- ja investointipäätöksiä taloudelliset reunaehdot huomioiden.

Elinkaaritaloudellisuus liittyy osatekijänä useisiin TERA-tutkimushankkeissa käynnissä oleviin tutkimus- ja kehitysprojekteihin. Vaikka lähestymistapa on joissakin tapauksissa teknisesti hyvin yksityiskohtainen, tutkimustieto tulee palvelemaan radan eri komponenttien keskinäistä vuorovaikutusta kuvaavan kokonaismallin kehittämistä. Esimerkiksi tarkasteltavana oleva radan jäykkyys on eräs suure, jonka perusteella voitaisiin kehittää geometriatiedon tueksi lisäparametri elinkaarikustannusmallin kunnon kehittymisen funktioihin.

Rajakustannusten laskemiseen on Suomessa valittu tietty kustannusfunktio, mutta lienee mahdollista kehittää laskentajärjestelmää siten, että olisi mahdollista verrata erilaisten kustannusfunktioiden tuottamia tuloksia. Rajakustannuslaskennan kehittäminen myös eri kalustotyypeille on mahdollista Ruotsin mallin mukaan.

Kunnossapidon optimointia on mahdollista kokeilla jollakin nykyisin muissa maissa käytössä olevilla kaupallisella järjestelmällä, sen jälkeen kun on kerätty riittävästi lähtötietoja. Kaupallisia järjestelmiä voidaan myös hyödyntää jatkotutkimuksessa kehitettyjen mallien testaamisessa ja validoinnissa.

Nykyisin rataosittain tehtävät elinkaariselvitykset vaatisivat systemaattisempaa ohjeistusta ja erityisesti pitkillä rataosilla keskiarvoistamisen sijaan tarkempaa jaottelua ja kunnon kehittymisen arviointia. Elinkaariselvitysten ohjeistamista voidaan tarkentaa pilottikohteiden tietojen perusteella kehitettyjen kunnon kehittymisfunktioiden avulla.

Kirjallisuus

- Anbazhagan, P., Lijun, S., Buddhima, I. & Cholat, R. 2011, "Model track studies on fouled ballast using ground penetrating radar and multichannel analysis of surface wave", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 74, no. 4, pp. 175-184.
- Andersson, M. 2002, *Strategic Planning of Track Maintenance - State of the Art*, TRITA-INFRA 02-035, Borlänge.
- Andrade, A.R. 2008, *Renewal decision from a life-cycle cost (LCC) perspective in railway infrastructure: An integrative approach using separate LCC models for rail and ballast components*, Technical University of Lisbon.
- Berggren, E. 2009, *Railway Track Stiffness. Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance*, Royal Institute of Technology (KTH).
- Bonaventura, C.S., Zarembski, A.M. & Palese, J.W. 2011, "Determination of Optimum Intervention Time for Track Surfacing Based on Economic Minimization of Maintenance Costs", *International Heavy Haul Association Conference IHHA*, Calgary, Canada, 19th-22nd June 2011.
- Braghin, F., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S. & Bruni, S. 2006, "A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear", *Wear*, vol. 261, no. 11-12, pp. 1253-1264.
- Burstow, M. 2004, *Whole Life Rail Model Application and Development for RSSB - Continued Development of an RCF Damage Parameter*, Rail Safety and Standards Board, Iso-Britannia.
- Chrismer, S. 1994, *Mechanics-based model to predict ballast-related maintenance timing and costs*, Electronic Doctoral Dissertations for UMass Amherst.
- Chrismer, S. & Read, D.M. 1994, "Examining ballast and subgrade conditions", *Railway Track and Structures*, vol. 90, no. 6, pp. 39-42.
- Crawford, S., Murray, M. & Powell, J. 2001, "Development of a Mechanistic Model for the Determination of Track Modulus", *Proceedings 7th International Heavy Haul Conference, IHHA*, Brisbane, Australia.
- Dahlberg, T. 2010, "Railway track stiffness variations - consequences and counter-measures", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12.
- Dembosky, M.A., Greenwood, S.P. & Doherty, A. 2011, "Minimising lifecycle costs using Trac-Ex damage and cost estimates", *World Congress on Railway Research, WCRRWCRR*, Lille, France, May 22-26.
- Dos Santos, G.F.M., Lopes, L.A.S., Kina, E.J. & Tunna, J. 2010, "The influence of wheel profile on the safety index", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, no. 5, pp. 429-434.
- EN 50126-1 1999, *Railway applications - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Basic requirements and generic process*, 2010th edn, CENELEC, Brussels.
- Esvel, C. 2001, *Modern Railway Track*, 2nd edn, MRT-Productions, Zaltbommel.
- Meissonnier F. 2000. Eurobalt II. Final report. Technical part.

- Froehling, R.D. 2007, "Wheel/rail interface management in heavy haul railway operations - applying science and technology", *Vehicle System Dynamics*, vol. 45, no. 7-8, pp. 649-677.
- Fröhling, R.D., Scheffel, H. & Ebersöhn, W. 1996, "The vertical dynamic response of a rail vehicle caused by track stiffness variations along the track", *Vehicle System Dynamics*, vol. 25, no. SUPPL., pp. 175-187.
- García Márquez, F.P., Lewis, R.W., Tobias, A.M. & Roberts, C. 2008, "Life cycle costs for railway condition monitoring", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 44, no. 6, pp. 1175-1187.
- Haapalahti, A., Seppä, J. & Laine, K. 2010, *Kuntoanalyysien uudet mallit, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä*, Edita Prima Oy, Helsinki.
- Hakulinen, P., Korkeamäki, S. & Nurmikolu, A. 2011, *Katsaus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksen perusteisiin*, Julkaisematon raporttiluonnos, Tampere.
- Hokstad, P. 1998, *Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems*, SINTEF, Trondheim, Norway.
- Holzfeind, J. & Hummitzsch, R. 2008, "Qualitätsverhalten von Gleisen", *ZEV Rail Glasers Annalen*, vol. 132, no. 6-7, pp. 212-224.
- Hyslip, J.P. 2007, "Substructure maintenance management: its time has come", *Proceedings of AREMA Annual Conference 2007* AREMA, Chicago, 9th -12th September.
- Härkönen, A. 2008, *A Collaborative Process of Product Lifecycle Management for Railway Signalling Infrastructure*, Helsinki, Ratahallintokeskus
- IEC 60300-3-3 2004, *Dependability management - Part 3-3: Application guide - life cycle costing*, 2.0th edn, IEC, Switzerland.
- IEC 61025 2006, *Fault tree analysis (FTA)*, 2.0th edn, Switzerland.
- IEC 61165 2006, *Application of Markov techniques*, Second edition edn, Switzerland.
- InfraRYL 2010, *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, Osa 1 Väylät ja alueet*, Rakennustieto Oy, Helsinki.
- Innotrack D1.3.2 2008, *The state of the art of the simulation of vehicle track interaction as a method for determining track degradation rates, Part One – Strategic Models*, Innotrack.
- Innotrack D1.3.3 2009, *Final report on Root Causes of Problem Conditions and Priorities for Innovation*, Innotrack project TIP5-CT-2006-031415.
- Innotrack D1.3.6 2009, *The state of the art of the simulation of vehicle track interaction as a method for determining track degradation rates - Part 2 - High resolution models and the level of the validation*, Innotrack project TIP5-CT-2006-031415.
- Innotrack D1.4.9 2009, *Guidance note 2009, Infrastructure maintenance cost breakdown structure*, Innotrack project TIP5-CT-2006-031415.
- Innotrack Deliverable D1.4.6 2009, *A report providing detailed analysis of the key railway infrastructure problems and recommendation as to how appropriate existing cost categories are for future data collection*, Innotrack project TIP5-CT-2006-031415.
- Innotrack Deliverable D1.4.8 2009, *Overall cost reduction*, Innotrack project TIP5-CT-2006-031415.

- Innotrack Guideline D6.2.2 2008, D6.2.2 Benchmark of LCC tools, Innotrack project TIP5-CT-2006-0314150.
- Innotrack Guideline D6.5.4 2006, Guidelines for LCC and RAMS analysis, Innotrack project TIP5-CT-2006-031415.
- ISO/IEC 15909-1 2004, Software and system engineering - High Level Petri Nets - Part 1: Concepts, definitions and graphical notation, 1st edn, ISO/IEC, Switzerland.
- Jaiswal, J., Blair, S., Stevens, A., Kay, T., Iwnicki, S.D. & Bezin, Y. 2002, "A systems approach to evaluating rail life", Railway Engineering/ECS Publications, London, 3-4 July 2002.
- Jianmin, Z., Chan, A.H.C. & Stirling, A.B. 2006, "Risk analysis of derailment induced by rail breaks - A probabilistic approach", *2006 Annual Reliability and Maintainability Symposium, RAMS'06*, 23 January 2006 through 26 January 2006, pp. 486.
- Johansson, P. & Nilsson, J.-. 2004, "An economic analysis of track maintenance costs", *Transport Policy*, vol. 11, no. 3, pp. 277-286.
- Jovanovic, S. 2003, "ECOTRACK helps reduce permanent way maintenance costs", *Eisenbahningenieur*, vol. 54, no. 5, pp. 30-34.
- Jovanovic, S. 2001, "ECOTRACK: Functionalities and experiences with trial implementation of the ECOTRACK system on the NS network", *Rail International*, vol. 32, no. 12, pp. 249.
- Jovanovic, S. & Zaalberg, H. 2000, "ECOTRACK: Two years of experience", *Rail International*, vol. 31, no. 4, pp. P2-P8.
- Kalliainen, A., Luomala, H., Jäniskangas, T., Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2011, *Radan eristys- ja väliterroksen tiiviys- ja kantavuustutkimus*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Kauppinen, M. 2010, *Ratakiskon elinkaari*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Kivipuro, M., Reunanen, M. & Valkokari, P. 2008, "Hallitse RAMS-vaatimukset", *Pro-maint*, vol. 7, pp. 27-29.
- Korkeamäki, S. 2010, *Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Koskela, O. 2009, *Ratojen elinkaariajattelu ja ratahankkeiden kannattavuuslaskennan ongelmat, diplomityö*, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Kumar, S. 2008, *Reliability analysis and cost modeling of degrading systems*, Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology.
- Kumar, S. 2006, *A study of the rail degradation process to predict rail breaks*, Luleå University of Technology.
- Länsivaara, T., Lehtonen, V. & Mansikkamäki, J. 2011, "Ratapenkereiden stabiilitetti", *Liikenteen suunta*, vol. 2, pp. 28-31.
- Larsson, D. 2004, *A Study of the Track Degradation Process Related to Changes in Railway Traffic*, Luleå University of Technology, Luleå Railway Research Centre.
- Leong, J. & Murray, M.H. 2008, "Probabilistic analysis of train-track vertical impact forces", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, vol. 161, no. 1, pp. 15-21.
- Leong, J. 2007, *Development of a limit state design methodology for railway track*, Queensland University of Technology.

- Li, H. & Huang, Q. 2008, "A study on reliability of railway sleeper system based-on finite Markov chain imbedding approach", *2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008* IEEE, .
- Li, D., Yoshino, D. & Tunna, J. 2004, "RTLM for track asset management", *RT and S: Railway Track and Structures*, vol. 100, no. 4, pp. 15-17.
- Lichtberger, B. 2005, *Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*, 1st edn, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG.
- Liikenne- ja viestintäministeriö 2003, *34/2003 Liikenneväylähankkeiden arvioinnin yleisohje*, Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki.
- Liikennevirasto 2011a, *Liikenneväylien hankearvioinnin yleisohje 14/2011*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Liikennevirasto 2011b, *Suomen rautatietilasto 2011*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Liikennevirasto 2011c, *Liikenneviraston toiminta- ja taloussuunnitelma vuosille 2012-2015*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Liikennevirasto 2010a, *Radan ja turvalaitteiden kunnossapito 2011-2016 kunnossapitoalue 6 (Savon rata) Liite 1. Tarjouspyyntö. Kunnossapitosopimus.*, Helsinki.
- Liikennevirasto 2010b, *Radan ja turvalaitteiden kunnossapito 2011-2016 kunnossapitoalue 6 (Savon rata) Liite 1.5. Tarjouspyyntö. Kunnossapitotöiden tehtäväluettelo*, Helsinki.
- Liikennevirasto 2010c, *Routaselvitys 2010 Liikenteellinen ja geotekninen tarkastelu 31.12.2010*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Liikennevirasto 2010d, *Talvi 2009-2010 Suomen rautateillä - tapahtumat ja johtopäätökset*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet 2006, *Liikkuvan kaluston yleiset tekniset määräykset*, Määräys edn, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Lindberg, G. 2009, *CATRIN Deliverable D12, Conclusions and recommendations*, Funded by Sixth Framework Programme, VTI, Stockholm.
- Link, H. 2009, *CATRIN, Deliverable 8, Rail Cost Allocation for Europe-Annex 1A-Marginal costs of rail maintenance in Austria*, Funded by Sixth Framework Programme, VTI, Stockholm.
- Link, H., Stuhlemmer, A., Haraldson, M., Abrantes, P., Wheat, P., Iwnicki, S., Nash, C. & Smith, A. 2008, *CATRIN, Deliverable D.1, Cost Allocation Practices in the European Transport Sector. Funded by Sixth Framework Programme.*, VTI, Stockholm.
- Loizos, A., Silvast, M. & Dimitrellou, S. 2007, *Railway trackbed assessment using the GPR technique*, .
- Lyngby, N., Hokstad, P. & Vatn, J. 2008, *RAMS Management of Railway Tracks in Handbook of Performability Engineering*, Springer London, London.
- Martland, C.D., Hargrove, M.B. & Auzmendi, A.R. 1994, "TRACS: a tool for managing change", *Railway Track and Structures*, vol. 90, no. 10, pp. 27-29.
- Mohammadzadeh, S. & Vahabi, E. 2011, "Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration", *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 1, pp. 421-432.

- Murray, M.H. 2010, "Renewing concrete sleepers - how long can they last?", *Conference On Railway Engineering* RTSA, Wellington, 12-15 September.
- Mäkelä, E. 2011, "Rataverkon luokittelu", *Liikenteen suunta*, vol. 2, pp. 32-37.
- Nash, C. 2005, "Rail Infrastructure Charges in Europe", *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 39, pp. 259-278(20).
- Nervola, A. 2009, *Rautatieliikenteen täsmällisyyden kehittäminen suorituskannustinjärjestelmällä*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Nielsen, J.C.O. 2008, "High-frequency vertical wheel-rail contact forces-Validation of a prediction model by field testing", *Wear*, vol. 265, no. 9-10, pp. 1465-1471.
- Nieminen, J. & Jokiniemi, R. 2007, *Elinkaariselvitys 2007: Rataosan 1104 Pasila - Kirkkonummi*, Ratahallintokeskus.
- Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2010, *Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raideseppelin ominaisuuksiin*, Liikennevirasto, Helsinki.
- Nurmikolu, A., Kerokoski, O., Rantala, T. & Viitala, T. 2010, "Cyclic loading tests of concrete sleepers with varying ballast condition", *ASME 2010 Joint Rail Conference, JRC2010*, 27 April 2010 through 29 April 2010, pp. 257.
- Nurmikolu, A., Pyökkänen, K., Luomala, H. & Kuula-Väisänen, P. 2011, "Routahaitat väylärakenteen elinkaareissa", *Liikenteen suunta*, vol. 2, pp. 16-19.
- Nurmikolu, A. 2005, *Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in structural layers of railway track*, Tampere University of Technology, Tampere.
- Nurmikolu, A. 2000, *Raideseppelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään*, diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Nurmikolu, A. 2006., *Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkkyyt: kokeellinen tutkimusosuus*. Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Nurmikolu, A., Kolisoja, P. & Korkeamäki, S. 2009, *Esiselvitys akseli- ja metrikuormien korotuksen yleisestä teknistaloudellisuudesta ja case-tarkastelu Kemi-Kolari rataosalla*. Ratahallintokeskus. Helsinki
- Nurmikoulu, A. 2011, "Liikennöinnin tarpeet sanelevat radan edullisimman parantamistason", *Liikenteen suunta*, vol. 4, pp.30-33.
- Ojanperä, K. 2006, *Rataverkon kuntoindeksit*, Helsinki.
- O'Neill, H., Garner, R.T. & Wood, S. 2008, "Modelling the impact of tolerances on swept envelope using Monte Carlo analysis", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 222, no. 3, pp. 297-311.
- Paavilainen, J. 2009, *Rataverkon kunnon ja sen liikenteellisten vaikutusten visualisoinnin lähtökohdat*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Passi, T. 2007, *Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnon arvioinnissa*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Patra, A.P. 2009, *Maintenance decision support models for railway infrastructure using RAMS & LCC analyses*, Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.
- Patra, A.P. 2007, *RAMS and LCC in Rail Track Maintenance*, Luleå University of Technology, Luleå.

- Patra, A.P., Dersin, P. & Kumar, U. 2010, "Cost effective maintenance policy: A case study", *International Journal of Performability Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 595-603.
- Patra, A.P. & Kumar, U. 2010, "Availability analysis of railway track circuits", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, no. 3, pp. 169-177.
- Patra, A.P., Kumar, U. & Kråik, P.-L. 2010, "Availability target of the railway infrastructure: An analysis", *Annual Reliability and Maintainability Symposium: The International Symposium on Product Quality and Integrity, RAMS 2010*, 25 January 2010 through 28 January 2010.
- Patra, A.P., Söderholm, P. & Kumar, U. 2009, "Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost: A case study from Swedish National Rail Administration", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 223, no. 3, pp. 285-293.
- Rantala, T. 2011, *Betoniratapölkyn vaurioitumismekanismit*, Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Ratahallintokeskus 2009, *Rataverkon käyttösojimus aikataulukaudelle 2010*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Ratahallintokeskus 2006, *Rautatieliikenne 2030, Radanpidon pitkän aikavälin suunnitelma*, Ratahallintokeskus, strategioita ja selvityksiä 2/2006, Helsinki.
- Ratahallintokeskus 2004a, *Ratainvestointien hankearviointiohje*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Ratahallintokeskus 2004b, *Tekniset toimitusehdot 54 E 1 ja 60 E 1 -kiskoille*. Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Ratatekniset ohjeet. Osa 11 2002, *Radan päällysrakenne*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Ratatekniset ohjeet. Osa 13 2004, *Radan tarkastus*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Ratatekniset ohjeet. Osa 3 2008, *Radan rakenne*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Ripke, B. 2000, "TETrAs - Technical and Economical Track Assessment -", *ETR*, vol. 49, no. 1/2, pp. 87-93.
- Rivier, R.E. 1998, "ECOTRACK: a tool for track maintenance and renewal managers", *Proceedings of the 1998 6th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems* Computational Mechanics Publ, Ashurst, United Kingdom, 2 September 1998 through 4 September 1998, pp. 733.
- Saariinen, M. 2008, *Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys*, Ratahallintokeskus A7, Helsinki.
- Schmid, F., Burstow, M., Clark, S., Eickhoff, B., Hiensch, M., Hsu, S.S. & Kent, S. (eds) 2010, *Wheel-Rail Best Practice Handbook*, First edn, University of Birmingham Press; A & N Harris, Great Britain.
- SFS 7007, 2007, *Raidesepelikiivaineiksilta vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot*, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki
- Shu, X., Dembosky, M., Urban, C. & Wilson, N. 2010, "Rail Wear Simulation and Validation", *Proceeding of the 2010 Joint Rail Conference, USA*, April 27-29, 2010, pp. 1-10.

- Silvast, M., Nurmikolu, A., Wiljanen, B. & Levomaki, M. 2010, "An inspection of railway ballast quality using ground penetrating radar in Finland", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, no. 5, pp. 345-351.
- Simson, S.A., Ferreira, L. & Murray, M.H. 2000a, *Rail track maintenance planning: An assessment model*.
- Simson, S.A., Ferreira, L. & Murray, M.H. 2000b, *Rail track maintenance planning: An assessment model*.
- Spielmann, M., Scholz, R., Tietje, O. & Haan, P.d. 2005, "Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, no. 5, pp. 325-335.
- Steffens, D.M. 2005, Identification and Development of a Model of Railway Track Dynamic Behaviour, Queensland University of Technology.
- Sussmann, T.R., Selig, E.T. & Hyslip, J.P. 2003, "Railway track condition indicators from ground penetrating radar", *NDT and E International*, vol. 36, no. 3 SPEC., pp. 157-167.
- Tervonen, J. & Pekkarinen, S. 2007, Radan kulumisen rajakustannukset 1997-2005, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Trafi/14473/03.04.02.00/ 2010, Määräys radan rakenteesta ja kunnossapidosta, Rautatiemääräys, Helsinki.
- Tuominen, M. 2004, *Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset*, Ratahallintokeskus, Helsinki.
- Tuominen, A. 2010, *Rataverkon luokittelun vertailu kantavuuden mukaan*, Liikennevirasto, Helsinki.
- UIC 2010, *Monitoring Track Condition to improve Asset Management*, International Union of Railways (UIC), Paris.
- UIC 2009, *Under sleeper pads, UIC Project, Summarising report*, UIC, Wien.
- UIC 2007, *Final report Maintenance/Renewal Optimisation*, UIC.
- van der Weide, J.A.M., Pandey, M.D. & van Noortwijk, J.M. 2010, "Discounted cost model for condition-based maintenance optimization", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 95, no. 3, pp. 236-246.
- van Noortwijk, J.M., Kallen, M.J. & Pandey, M.D. 2005, "Gamma processes for time-dependent reliability of structures", *Proceedings of ESREL 2005 - European Safety and Reliability Conference*, ed. K. Kolowrocki, Taylor & Francis Group, London, 27-30 June, pp. 1457-1464.
- van Noortwijk, J.M., van der Weide, J.A.M., Kallen, M.J. & Pandey, M.D. 2007, "Gamma processes and peaks-over-threshold distributions for time-dependent reliability", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 92, no. 12, pp. 1651-1658.
- Veit, P. & Marschnig, S. 2011, "Preconditions for a sustainable Low Cost Track", *International Heavy Haul Association Conference IHHA*, Calgary, Canada, 19th-22nd June 2011.
- Veit, P. & Marschnig, S. 2009, "Technical and economical aspects to Under Sleeper Pads - Part 2: Economic efficiency in the ÖBB-network", *ZEV Rail Glasers Annalen*, vol. 133, no. 11-12, pp. 436-443.

- Wang, F.T., Guo, R. & Liu, R.K. 2010, "Research on Track Alignment Irregularity Prediction Models", Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference, USA, April 27-29, 2010, pp. 1-6.
- Wheat, P., Smith, A. & Nash, C. 2009, *CATRIN, Deliverable 8 - Rail Cost Allocation for Europe*, Funded by Sixth Framework Programme. VTI, Stockholm.
- Yun, W.Y. & Ferreira, L. 2003, "Prediction of the demand of the railway sleepers: A simulation model for replacement strategies", *International Journal of Production Economics*, no. 81-82, pp. 589-595.
- Zarembski, A.M. & Newman, G.R. 2008, "Comparative Technical and Economic Analysis of Stoneblowing vs. Tamping", *AREMA 2008 Annual Conference and Exposition*, Arema, Salt Lake City, UT, September 2008.
- Zarembski, A.M. & Patel, P. 2010, "Estimating maintenance costs for mixed higher speed passenger and freight rail corridors", *Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference, JRC2010*, ASME, Urbana, IL, USA.
- Zerbst, U., Schödel, M. & Heyder, R. 2009, "Damage tolerance investigations on rails", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, no. 17, pp. 2637-2653.
- Zhang, Y.-., Murray, M. & Ferreira, L. 2000, "Modelling rail track performance: An integrated approach", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, vol. 141, no. 4, pp. 187-194.
- Zhao, J., Chan, A.H.C., Roberts, C. & Stirling, A.B. 2006, "Assessing the economic life of rail using a stochastic analysis of failures", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 220, no. 2, pp. 103-111.
- Zoeteman, A. 2004, *Railway design and maintenance from a life-cycle cost perspective : a decision-support cycle*, Netherlands Research School for Transport, Infrastructure and Logistics.
- Öberg, J. & Andersson, E. 2009, "Determining the deterioration cost for railway tracks", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 223, no. 2, pp. 121-129.
- Öberg, J., Andersson, E. & Gunnarson, J. 2007, *Track access charging with respect to vehicle characteristics*, Banverket, Borlänge.

Elinkaarikustannuslaskennassa ja kunnon kehittymisen arvioinnissa käytettyjä ohjelmistoja

Nimi	Toteuttajat/Kehittäjät	Pääsisältö Käytetyt menetelmät	Viitteet
CATLOC	Systecon AB, Ruotsi	Joustava kustannuslaskentajärjestelmä, johon käyttäjä voi itse syöttää LCC mallin. http://www.systecon.se/case/C4_CATLOC/	(Innotrack Guideline D6.2.2 2008)
DeCAyS	KTH, Ruotsi	Malli päällysrakenteen kulumiskustannusten arvioimiseksi. Keskittyy ensisijaisesti kiskon kulumiseen, huomioi myös erilaisen kaluston aiheuttamat kulumiserot. Excel-pohjainen malli	(Öberg, Andersson 2009)
DeCoTrack	Luulajan teknillinen yliopisto, Ruotsi	Simuloidaan radan vaurioitumiskustannuksia liikenteen muutoksen funktiona. Malli on kehitetty sekaliikenteelle	(Larsson 2004)
D-LCC	Deutsche Bahn AG	Kustannuslaskentajärjestelmä, johon voidaan syöttää projektikohtaisesti malli ja yksilöityjä tietoja. Sisältää myös herkkyystarkastelun. Laskennassa käytettyjä muuttujia voidaan painottaa erilaisilla kertoimilla	(Innotrack Guideline D6.2.2 2008)
DSS	Delftin yliopisto, Hollanti	Päätöksentekoa tukeva, koko rataympäristön toiminnan kattava elinkaariarviointijärjestelmä. Microsoft Excel-pohjainen järjestelmä.	(Zoeteman 2004)
DTrack	Queenslandin yliopisto/Rail Innovation Australia Ltd	Mallin avulla voidaan tutkia radan dynaamisia kuormituksia ja pyörä-kisko vuorovaikutuksia. Mallin perustana on radalta saatu pyörävoimailmaisimista saatu mittaustieto, jota käsitellään tilastollisilla menetelmillä.	(Steffens 2005, Leong, Murray 2008)
EcoGrind, SmartGrind, Grind-Manager	Zeta-Tech, USA	Kiskonhionnan optimointiin ja kunnonossapitoon kehitettyjä ohjelmistoja, EcoGrind sisältää myös kustannukset. Lähtökohtana halutun kiskoprofiilin kirjastotietokanta, jonka perusteella lasketaan dynaaminen ”eroprofiili” nykytilaan verrattuna. Laskennassa käytetään ohjelmistokehittäjän omia algoritmeja.	www.zetatech.com/

Nimi	Toteuttajat/Kehittäjät	Pääsisältö Käytetyt menetelmät	Viitteet
ITDM	Queenslandin yliopisto, Australia	Malli perustuu radan eri komponenttien mekanistisiin suhteisiin ja koostuu eri rakenneosia kuvaavista moduuleista. Mallissa eri komponenttien väliset vuorovaikutussuhteet otetaan huomioon siten, että yhdessä komponentissa tapahtuva vaurioituminen muuttaa kiskoon kohdistuvia dynaamisia voimia.	(Zhang, Murray & Ferreira 2000) (Crawford, Murray & Powell 2001)
LCCWare	Isograph Ltd (USA, Kanada, Iso-Britannia)	Kustannuslaskentajärjestelmä, johon käyttäjä voi luoda muun muassa omia kustannusfunktioita. (Yritys myy myös useita muita järjestelmiä RAMS, Monte Carlo simulaatio, Markovin ketju, vika-puuanalyysi) http://www.isograph-software.com/index.htm	(Innotrack Guideline D6.2.2 2008)
MOWIS	Zeta-Tech, USA	Kunnossapidon reaaliaikainen tietojärjestelmä. Sisältää kaiken oleellisen tiedon rakenteista, niiden kunnosta ja vaurioista, voidaan päivittää reaalijaksossa, myös komponenttien varastokirjanpito	www.zetatech.com/
MPLIPM	RTRI, Japani	Radan geometriamittaustiedon ja liikennemäärän perusteella tehty epäta-saisuuden kehittymistä ennustava malli. Malli ottaa huomioon lujuuden muodonmuutokset, käyttöolosuhteet ja kunnossapidon.	(Wang, Guo & Liu 2010)
NMF	DeltaRail, Iso-Britannia	Investointien arviointiin kehitetty järjestelmä, johon on integroitu myös jo käytössä olevat kustannusten, kunnossapidon ja korvausinvestointien mallit.	http://www.deltarail.com
NUCARS	TTCI, USA	Kaluston ja kiskon välisen vuorovaikutuksen simulointi. Sisältää myös kisko-pyöräkontaktin voimien laskennan.	Useita artikkeleita http://www.aar.com/
PWMIS	Zeta-Tech, USA	Kunnossapidon optimoinnin kokonaispaketti, rakenneosien kunnan kehittyminen. Sisältää komponentit RailLife, TrackLife, Ballastlife ja Tie-Report. Ballast Life perustuu empiiriseen kokemukseen. Kiinan rautateille kehitetty järjestelmä	www.zetatech.com/
RailLife	Zeta-Tech, USA	Kiskon kunnan kehittymisen arviointi mittaustuloksiin perustuen. Voidaan hyödyntää kiskojen vaihtojen suunnitteluun ja kunnossapidon raja-arvojen määrittämiseen.	www.zetatech.com/

Nimi	Toteuttajat/Kehittäjät	Pääsisältö Käytetyt menetelmät	Viitteet
		Käyttää Weibull-menetelmää väsymisen ennustamiseen ja monimuuttuja-regressio-analyysiä kulumisen ennustamiseen.	
Relex LCC	Relex	Ensisijaisesti teollisuuden käyttämä kustannuslaskentajärjestelmä, jota voidaan soveltaa myös rataympäristöön. http://www.relex.fi/	(Innotrack Guideline D6.2.2 2008)
Repoman	MIT (USA)	1980-luvun lopulla ja 1990-luvun alussa kehitetty prototyyppi ohjelmisto kiskojen asennuksen aikataulutusta varten. Asiantuntijajärjestelmä.	(Andersson 2002)
RSD	Delta Rail Group Ltd	Kiskojen vierintäväsymiseen ja kulumiseen sovellettava malli	Useita artikkeleita http://www.deltarail.com
RTLm	TTCI, USA	Radan elinkaarimallinnuksen ohjelmisto jolla voidaan tehdä komponenttien vaurioitumisanalyysyjä, kunnossapidon suunnittelua ja elinkaarikustannuslaskentaa. Voidaan mallintaa kiskon ja pyörän kulumista, vierintäväsymistä, puupölkkyjen vaurioitumista, vaihteiden ja sepelin kulumista sekä radan epätasaisuuden muutoksia.	(Li, Yoshino & Tunna 2004)
SmartLube	Zeta-Tech, USA	Vaihtoestoisten voiteluaineiden taloudellinen analysointi. Kustannuskategoriat: kunnossapito, kitka, melu, polttoaineenkulutus, hiontakustannukset, radalta suistuminen. Laskennan perusteena on määritetty juna tietyllä reitillä.	www.zetatech.com/
TETrAs	Deutsche Bahn, Saksa	Simulointityökalu ratarakenteen suunnittelua varten, ohjelmiston avulla voidaan laskea myös elinkaarikustannukset. Tietopankkijärjestelmä	(Ripke 2000)
Track-Ex	Network Rail	Mallilla voidaan tutkia vierintäväsymissäröjen syntymistä, kulumista ja kiskoprofiilin muutoksia. Sisältää myös kustannusmallin, jonka avulla voidaan analysoida esimerkiksi erilaisien ratavaihtoehtojen tai kunnossapitostrategioiden välisiä eroja sekä kiskon elinkaarikustannuksia	(Dembosky, Greenwood & Doherty 2011)

Nimi	Toteuttajat/Kehittäjät	Pääsisältö Käytetyt menetelmät	Viitteet
Tracklife	Zeta-Tech, USA	Radan geometrian analysointi ja ennustaminen. Voidaan hyödyntää geometrisen aseman korjauksen ja kunnossapidon suunnitteluun. TQI:n laskenta, ennusteet lyhyelle, keskipitkälle ja pitkälle aikavälille homogeenisten rataosien jaksoissa	www.zetatech.com/
TRACS	MIT, USA	Kunnon kehittymisen mallien ja elinkaarikustannuslaskennan yhdistelmä. Mallin avulla voidaan laskea kunnossapito ja investointikustannukset ratageometrian, radan komponenttien, radan kunnon ja liikenteen koostumuksen perusteella. Kunnon kehittymisen mallit perustuvat kontrolloiduissa olosuhteissa tehtyihin tutkimuksiin TTCI:ssä ja AAR:ssä sekä käytännöstä saatuihin tuloksiin.	(Martland, Hargrove & Auzmendi 1994)
T-SPA	Network Rail, Iso-Britannia	Strategisen suunnittelun työkalu pitkän tähtäimen kustannus- ja investointisuunnitteluun.	(Wheat, Smith & Nash 2009)
UNIFE-UNILIFE-UNIDATA	Association of the European Rail Industry (UNIFE)	Ensisijaisesti kustannustiedon keräämiseen ja siirtoon soveltuva järjestelmä. Hyödynnetään kunnossapitokustannusten laskemisessa. LCC laskenta osittain puutteellinen. Microsoft Excel-pohjainen järjestelmä	(Innotrack Guideline D6.2.2 2008) http://www.unife.org
Vampire	DeltaRail, Iso-Britannia	Kaluston dynaaminen malli, jota voidaan simuloida todellisista olosuhteista mitatussa ratageometriassa.	Useita artikkeleita http://www.deltarail.com
WLRM	RSSB (Rail Safety and Standard board), Iso-Britannia	Kiskon elinkaarimalli. Kehitystyötä on jatkettu ja Track-ex on kehitystyön seuraava tuote.	(Burstow 2004)
VTISM	Network Rail, Rail Safety and Standards Board, Iso-Britannia	Strategisen suunnittelun työkalu, joka yhdistää VAMPIRE, T-SPA ja WLRM tulokset kunnossapidon ja korvausinvestointien optimoimiseksi ottaen myös huomioon kaluston ja radan erityispiirteet.	(Innotrack D1.3.2 2008) http://www.deltarail.com/

